

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.91069

我国北部冬麦区小麦区域试验重复次数和试点数量的优化设计

张毅¹ 许乃银² 郭利磊¹ 杨子光³ 张笑晴¹ 杨晓妮²

¹ 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125; ² 江苏省农业科学院, 江苏南京 210014; ³ 洛阳农林科学院, 河南洛阳 471022

摘要: 农作物品种区域试验重复次数和试点数量的合理配置有利于提高试验的成本效率和品种选择效率。本研究分析了2010—2019年期间北部冬麦区小麦品种区域试验的重复次数和试点数量设置的合理性, 依据小麦品种试验的信噪比和遗传力水平随重复次数和试点数量的变化规律, 提出了重复次数和试点数量的优化设计方案。结果表明: (1) 北部冬麦区小麦单点试验的遗传力平均达到0.87, 需要的重复次数平均值仅为1.4, 说明3次重复可以充分保证试验精确度的需求。(2) 北部冬麦区水地组和旱地组小麦区域试验达到0.75的遗传力水平时, 需要的试点数量分别为11个和13个, 目前有效试点数量分别约为11个和8个, 分别达到0.75和0.60的遗传力水平。(3) 小麦品种区域试验结果对品种的审定和应用十分重要, 而每年都可能存在少数试验点因为各种异常情况而报废, 为保证试验结果的可靠性, 可按 $H = 0.75$ 的水平需求安排试验点数量和重复次数, 即重复次数可保持当前的3次; 水地组的试点数量可保持在11个左右; 旱地组可将试点增加到13个; 如要将遗传力提高到0.80的水平, 则需约16个试点。

关键词: 小麦(*Triticum aestivum* L.); 区域试验; 遗传力; 信噪比; 重复次数; 试点数量

Optimization of test location number and replicate frequency in regional winter wheat variety trials in northern winter wheat region in China

ZHANG Yi¹, XU Nai-Yin², GUO Li-Lei¹, YANG Zi-Guang³, ZHANG Xiao-Qing¹, and YANG Xiao-Ni²

¹ National Extension and Service Center of Agricultural Technology, Beijing 100125, China; ² Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, Jiangsu, China; ³ Luoyang Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Luoyang 471022, Henan, China

Abstract: The rational allocation of the replicate frequency and test location number in regional crop trials are highly beneficial to the enhancement of both trial cost efficiency and new cultivar selection efficiency. The rationality of test location number and replicate frequency for national wheat regional trials in the Northern winter wheat region (NWWR) in China was evaluated by using historical experimental datasets during the last 10 years according to the dynamics of trial heritability and noise-signal quotient (Q) with the increase of test locations and replicates within trials in 2010–2019, proposing an optimal design scheme of the replicate frequency and test location number for the wheat planting region. The result indicated three replicates at current achieve 0.87 of the averaged within-trial heritability of single-trials in NWWR, and only 1.4 times of replicates on average was needed to achieve 0.75 of within-trial heritability, so three replicates were obviously sufficient to maintain enough test accuracy. The needed test location number to achieve 0.75 of cross-trial heritability was estimated as 11 for the irrigated group and 13 for the rainfed group in the one-year multi-locational trials in NWWR, while in the current wheat trials that was about 11 and 8 effective test locations, achieving a heritability level of 0.75 and 0.60, respectively. The irrigated group was exactly meet the trial accuracy requirement ($H = 0.75$), while the rainfed group was somewhat insufficient. Considering the importance of the regional wheat trials in recommending new varieties for registration and production, and the possible trial cancellation due to various abnormalities, the practical management should set a heritability level around 0.75, and maintain three replicates, with around 11 test locations for the irrigated group, and 13 locations for the rain-fed group. In order to increase heritability to the level of 0.80, about 16 test locations should be required.

Keywords: wheat (*Triticum aestivum* L.); regional trial; heritability; noise-signal quotient; number of replicate; number of test location

本研究由国家农作物品种区域试验专项资助。

This study was supported by the Special Project of National Crop Regional Trials.

第一作者联系方式: E-mail: zhangy@oilcrops.cn, Tel: 010-64194512

Received (收稿日期): 2019-11-29; Accepted (接受日期): 2020-03-24; Published online (网络出版日期): 2020-05-08.

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20200507.1620.010.html>

小麦(*Triticum aestivum* L.)是我国第三大粮食作物,种植面积仅次于玉米和水稻。北方冬麦区主要包括河北大部、河南、山东、山西南部、江苏和安徽北部、陕西和甘肃部分地区,是我国小麦主要产区,种植面积约占全国小麦总面积的 70%,总产占 75%左右^[1]。北方冬麦区主要包括辽宁南端的营口和大连市;河北省境内长城以南的廊坊、保定、沧州、唐山和秦皇岛市全部;京、津两市全部;山西省朔州以南阳泉、太原、晋中、长治和吕梁等市全部和临汾市北部地区;陕西省延安市全部、榆林长城以南大部,咸阳、宝鸡和铜川市部分县;甘肃省陇东庆阳市全部和平凉市的部分县^[2]。北方冬麦区作为北方冬麦区的重要产区,提供了其中 22%以上的产量^[3]。加强适应于该区域生态条件的小麦新品种选育和推广应用对保障小麦生产水平和我国粮食安全具有重要意义。小麦品种区域试验在多环境条件下对新品种的丰产性、稳产性、适应性、抗逆性、品质等性状进行测试与综合评价,对促进我国小麦品种更新和保障小麦生产水平起着重要的作用^[4]。区域试验的可靠性主要决定于试验效率,而试验效率又决定于试验遗传力^[5-6]。遗传力是遗传方差占表型方差的比率^[7],区域试验的遗传力越高,对品种的选择效率就越高^[8]。遗传力随着试验重复次数和试点数量的增加速率呈先快后慢的“边际收益递减”规律^[6]。因此,如何合理设置试验试点数量和重复次数,既可保持可靠的遗传力水平和试验效率,又可合理利用有限的人力、物力和财力资源,是优化区域试验设置方案中亟待解决的问题。

严威凯等^[8]利用区域试验重复次数和试点数量与遗传力的函数关系,估算出燕麦品种试验在特定误差水平下不同遗传力水平需要的试验重复次数和试点数量,并指出通过增加试点数和重复次数可以快速提高遗传力的上限为 75%,其后遗传力提高的速率急剧降低,故认为试验遗传力达到 0.75 水平时需要的重复次数和试点数量是较适宜的数量。许乃银等^[5]对国家棉花区试的遗传力水平及其随着试点数量增加的规律进行了定量化分析,并提出针对各主产棉区的区域试验设置优化方案。关于小麦品种区域试验适宜重复次数和试点数量的相关研究未见报道。本研究的目的是综合利用重复次数和试点数量的估计方法,全面分析和评价 2010—2019 年期间我国北部冬麦区国家小麦品种试验重复次数和试点数量设置的科学性和优化方案,为国家小麦区域

试验的优化资源配置提供依据,并为其他作物品种区域试验的优化设置提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

2010—2019 年期间北部冬麦区水地组和旱地组小麦品种试验设置的试点数量和参试品种数详见表 1。所有试验均采用随机区组排列,重复 3 次,小区面积 12~14 m²。2009—2010 年度(简称为“2010 年”,下同)水地组区域试验以“京冬 8 号”为对照,以“中麦 175”辅助对照品种。其余年份水地组和旱地组小麦品种试验分别以中麦 175 和“长 6878”为对照品种。水地组常年在北京市的昌平和顺义;天津市的武清和宝坻;河北省的保定、遵化、滦南和固安;山西省的太原、屯留、介休等地共设置约 11 个试点(2015 年前在新疆设有阿拉尔试点)。旱地组常年山西省的高平、长子、长治和平凉;甘肃省的庄浪、定西、镇原和庆阳;宁夏的固原、隆德、彭阳等地共设置约 11 个试点。田间栽培管理按当地习惯和区域试验方案要求进行。本研究分别采用 2010—2019 年期间北部冬麦区小麦品种试验的 196 个单年单点试验(其中,水地组 112 个,旱地组 84 个)和 20 组一年多点试验的产量数据分析试验重复次数和试点数量与遗传力的关系,估算在特定遗传力水平下对重复次数和试点数量的需求。

1.2 统计分析

采用数据分析和管理系统 GGEbiplot Pattern Explorer^[9]对 2010—2019 年期间北部冬麦区小麦品种试验中 196 个单点试验分别进行方差分析,得出遗传方差和误差方差,再依据 Yan 等^[6,8]和许乃银等^[5]介绍的方法分别计算单点试验的信噪比、遗传力及遗传力为 0.75 时需要的试验重复次数,并根据 196 次单点试验在不同重复次数需求范围内的累积频数(cumulative frequency, *Cf*)分布规律,初步分析小麦品种区域试验的适宜重复次数。其次,对 20 组一年多点试验分别进行方差分析,得出遗传方差、品种与试点互作方差和误差方差,计算一年多点试验的信噪比、遗传力及遗传力为 0.75 时需要的试点数量,分别估计水地组和旱地组试验对试点数量的需求。然后,依据水地组和旱地组小麦品种试验的多次单点试验平均信噪比(Q_r)和一年多点试验平均信噪比(Q_o)与重复次数、试点数及遗传力的关系式,对不同重复次数和试点数量条件下的遗传力水平进行定量

分析。最后,依据遗传力与信噪比、重复次数和试点数的关系式,在设定区间内拟合遗传力增量与重复次数和试点数量增量的响应曲线,从而提出小麦品种试验重复次数和试点数量设置的优化方案。单年单点和一年多点区域试验的遗传力及其增量、信噪比、重复次数和试点数量的计算公式如下^[5-6]:

$$\text{单年单点试验的遗传力 } H = V_g / (V_g + V_e / n_r) \quad (1)$$

$$\text{单年单点试验的信噪比 } Q_r = V_e / V_g \quad (2)$$

$$\text{单年单点试验所需的重复数 } N_r = (V_e / V_g) \times H / (1 - H) = Q_r \times H / (1 - H) \quad (3)$$

$$\text{单年单点试验遗传力与重复次数及信噪比的关系式 } H = N_r / (N_r + Q_r) \quad (4)$$

$$\text{单年单点试验遗传力增量 } \Delta H = [N_r / (N_r + Q_r)] - [N_{(r-\Delta r)} / (N_{(r-\Delta r)} + Q_r)] \quad (5)$$

$$\text{一年多点试验的遗传力 } H = V_g / (V_g + V_{ge} / n_c +$$

$$V_e / n_c n_r) \quad (6)$$

$$\text{一年多点试验的信噪比 } Q_e = (V_{ge} + V_e / n_c) / V_g \quad (7)$$

$$\text{一年多点试验所需的试点数 } N_c =$$

$$[(V_{ge} + V_e / n_c) / V_g] \times H / (1 - H) = Q_e \times H / (1 - H) \quad (8)$$

$$\text{一年多点试验遗传力与试点数及信噪比的关系式 } H = N_c / (N_c + Q_e) \quad (9)$$

$$\text{一年多点试验遗传力增量 } \Delta H = [N_c / (N_c + Q_e)] - [N_{(c-\Delta c)} / (N_{(c-\Delta c)} + Q_e)] \quad (10)$$

式中, H 为遗传力, V_g 为遗传方差, V_e 为误差方差, n_r 为重复数, Q_r 为单点试验信噪比, N_r 为单点试验需要的重复数, V_{ge} 为品种与试点互动方差, n_c 为试点数量, Q_e 为一年多点试验的信噪比, N_c 为一年多点试验需要的试点数量, ΔH 为试验遗传力增量, Δr 和 Δc 分别为单位重复数和试点数, $N_{(r-\Delta r)}$ 和 $N_{(c-\Delta c)}$ 分别为在 N_r 和 N_c 基础上减少一个单位的重复数和试点数。

表 1 2010–2019 年我国北部冬麦区国家小麦品种区域试验组数、品种数和产量统计表

Table 1 Summary statistics of trial yield grand mean, number of cultivars and locations used in regional winter wheat variety trials in Northern winter wheat region from 2010 to 2019

年度 Year	水地组 Irrigated group			旱地组 Rainfed group			北部冬麦区 Northern winter wheat region	
	试点数 Site	品种数 Cultivar	产量 Yield (kg hm ⁻²)	试点数 Site	品种数 Cultivar	产量 Yield (kg hm ⁻²)	试点数 Site	品种数 Cultivar
	2009–2010	11	13	6178.1	9	9	3581.0	20
2010–2011	12	12	6717.5	9	10	3885.5	21	22
2011–2012	11	11	6895.7	7	8	5524.9	18	19
2012–2013	11	14	6119.9	9	10	3213.0	20	24
2013–2014	12	14	7485.6	9	10	5165.8	21	24
2014–2015	12	10	7935.6	10	13	5490.4	22	23
2015–2016	11	16	7996.1	7	12	4737.7	18	28
2016–2017	10	11	8536.2	9	12	4417.7	19	23
2017–2018	11	14	7153.2	9	8	4719.7	20	22
2018–2019	11	17	8367.4	6	8	4679.4	17	25
平均 Mean	11.2	13.2	7338.5	8.4	10.0	4541.5	19.6	23.2
合计 Total	112	132	—	84	100	—	196	232

2 结果与分析

2.1 单年单点小麦区域试验的重复次数分析

表 2 表明: (1)在北部冬麦区共 196 次单点试验中,在保证遗传力达到 0.75 水平下需要 1 次、2 次和 3 次重复以内的试验累积频率分别约为 69%、83%和 88%,需要 3~4 次重复、4~5 次重复和 5 次以上重复的试验比例分别约为 4%、2%和 7%。其中,水地组和旱地组

需要 3 次重复以内的试验累积频率分别约为 87%和 89%,差异不大。可见,采用 3 次重复可以保证近 90%的单点试验遗传力达到 0.75 的水平,仅有少数试点因试验误差偏大等原因导致遗传力偏低;(2)北部冬麦区共 196 次单点试验需要的重复次数总值仅为 1.4 次,其中,水地组和旱地组需要的重复次数平均都在 2 次以下,说明北部冬麦区小麦品种试验采用 3 次重复可以充分保证试验遗传力和试验效率符合试验质量要求。

表 2 2010–2019 年北部冬麦区单年单点小麦品种试验在遗传力为 0.75 时所需要重复数的次数分布

Table 2 Frequency distribution of replicates needed to achieve 0.75 of within-trial heritability for single-trials of regional winter wheat variety trials in Northern winter wheat region from 2010 to 2019

需要重复数 Interval of N_r needed	水地组 Irrigated group					旱地组 Rainfed group					北部冬麦区 Northern winter wheat region				
	N	$f(\%)$	$Cf(\%)$	N_r	Q_r	N	$f(\%)$	$Cf(\%)$	N_r	Q_r	N	$f(\%)$	$Cf(\%)$	N_r	Q_r
$N_r \leq 1$	75	67.0	67.0	0.40	0.13	60	71.4	71.4	0.30	0.10	135	68.9	68.9	0.36	0.12
$1 < N_r \leq 2$	14	12.5	79.5	1.41	0.47	14	16.7	88.1	1.34	0.45	28	14.3	83.2	1.38	0.46
$2 < N_r \leq 3$	8	7.1	86.6	2.34	0.78	1	1.2	89.3	2.00	0.67	9	4.6	87.8	2.30	0.77
$3 < N_r \leq 4$	4	3.6	90.2	3.37	1.12	3	3.6	92.9	3.30	1.10	7	3.6	91.3	3.34	1.11
$4 < N_r \leq 5$	2	1.8	92.0	4.20	1.40	1	1.2	94.1	4.37	1.46	3	1.5	92.9	4.26	1.42
$N_r > 5$	9	8.0	100.0	9.70	3.23	5	6.0	100.0	8.90	2.97	14	7.1	100.0	9.41	3.14
总计 Total	112	100.0	—	1.59	0.53	84	100.0	—	1.17	0.39	196	100.0	—	1.41	0.46

重复数范围是指在 $H = 0.75$ 时所需要的试验重复次数的分布范围。北部冬麦区包括水地组和旱地组。 N 、 $f(\%)$ 、 $Cf(\%)$ 、 N_r 和 Q_r 分别为次数、频数、累积频数、需要重复数和信噪比。

Range of N_r means the replicates needed to achieve 0.75 of heritability in half-open intervals. The Northern winter wheat region covers Irrigated region and Rainfed region. N , $f(\%)$, $Cf(\%)$, N_r , Q_r , and $H(\%)$ stand for number of times, frequency, cumulative frequency, replicate needed and noise-signal ratio in each interval, respectively.

2.2 小麦品种试验适宜重复数和试点数的定量分析

依据 2010—2019 年水地组、旱地组及北部冬麦区小麦品种试验的单点试验平均信噪比(Q_r)和一年多点试验平均信噪比(Q_e)与重复次数或试点数及遗传力的关系式, 在不同重复次数和试点数量条件下对遗传力水平的定量分析(图 1 和表 3)表明: (1)试验遗传力随着重复次数和试点数的增加, 表现为先快后慢的曲线关系。随着重复次数和试点数的增加, 遗传力在 0.75 以下时提升速度非常快, 为遗传力的“快速增长期”; 在 0.75 和 0.90 期间提升速率明显减

缓, 但仍有显著的增量, 为遗传力的“缓慢增长期”; 达 0.90 之后, 再增加重复次数或试点数量对遗传力的提高作用微小, 是遗传力的“增长停滞期”。(2)在遗传力为 0.75 水平下, 水地组、旱地组及北部冬麦区小麦品种试验需要的重复次数都在 2 次以下; 重复次数为 3 次的情况下, 水地组、旱地组及北部冬麦区小麦品种试验的遗传力分别达到了约 0.85、0.88 和 0.87 的水平, 已经充分保证了试验的精度要求; 如需将遗传力提高在 0.90 水平下, 则需要约 4~5 次重复, 其后继续增加重复次数对提高遗传力没有意义。(3)在遗传力为 0.75 水平下, 水地组、旱地组及

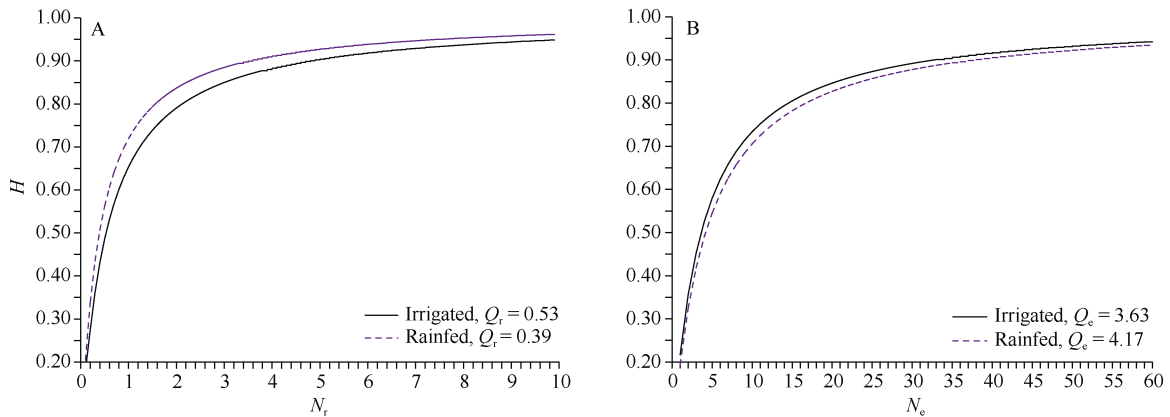


图 1 北部冬麦区小麦品种试验的遗传力(H)及其所需重复(N_r)或试点数量(N_e)的关系

Fig. 1 Relationship between heritability (H) and replicate (N_r) or test location number (N_e) for regional winter wheat variety trials in Northern winter wheat region

Irrigated 和 Rainfed 分别代表北部冬麦区的水地组和旱地组小麦品种试验; Q_r 和 Q_e 分别代表重复数信噪比和试点数信噪比。

Irrigated and Rainfed stand for the irrigated group and rainfed group in winter wheat variety trials of Northern winter wheat region. Q_r and Q_e stand for the noise-signal ratio of replicate and test location number, respectively.

表 3 北部冬麦区小麦品种试验在不同遗传力水平下需要的重复数和试点数量定量分析

Table 3 Replicate and test location number needed to achieve different heritability levels for regional winter wheat variety trials in Northern winter wheat region

试验因素 Trial factor	组别 Group	信噪比 Q_r/Q_c	数量 No.	不同遗传力(H)水平下需要的重复数和试点数 ^N Replicate and test location needed at different heritabilities (H) ^N									
				0.65	0.75	0.80	0.83	0.85	0.86	0.87	0.88	0.90	0.95
重复 Replicate	水地 Irrigated	0.53	3	1.0	1.6	2.1	2.6	3.0	3.3	3.5	3.9	4.8	10.1
	旱地 Rainfed	0.39	3	0.7	1.2	1.6	1.9	2.2	2.4	2.6	2.9	3.5	7.4
	北部冬麦区 NWWR	0.46	3	0.9	1.4	1.8	2.2	2.6	2.8	3.1	3.4	4.1	8.7
试点 Location	水地 Irrigated	3.63	11	6.7	10.9	14.5	17.7	20.6	22.3	24.3	26.6	32.7	69.0
	旱地 Rainfed	4.17	9	7.7	12.5	16.7	20.4	23.6	25.6	27.9	30.6	37.5	79.2
	北部冬麦区 NWWR	3.90	10	7.2	11.7	15.6	19.0	22.1	24.0	26.1	28.6	35.1	74.1

重复的信噪比(Q_r)为单年单点试验的平均值; 试点的信噪比(Q_c)一年多点试验校正平均值; 合格数量为 2010—2019 年期间北部冬麦区水地组和旱地组实际汇总的重复或试点数量。

The noise-signal ratio of replicate (Q_r) is the mean of all single trials in each group, while location Q_c is the mean of all one-year multi-locational trials in the group. ^N is the mean of replicates or test locations summarized in the annual wheat cultivar trial report of the irrigated group and rainfed group trials in Northern winter wheat region (NWWR) from 2010 to 2019.

北部冬麦区小麦品种试验需要的试点数量分别约为 11 个、13 个和 12 个; 水地组、旱地组及北部冬麦区小麦品种试验平均汇总的试点数分别约为 11 个、9 个和 10 个, 其试验遗传力分别达到了约 0.75、0.68 和 0.71 的水平, 水地组已经符合小麦品种试验的精确度要求, 而旱地组需要增加 4 个试点才可以达到试验的精确度要求; 在条件许可的情况下, 将旱地组试点数增加到 13 个, 可将整体试验的遗传力水平提升到 0.75; 如需将遗传力提高到 0.85 水平, 则水地组和旱地组分别需要约 21 个和 24 个试点; 如需将遗传力提高到 0.90 水平, 则水地组和旱地组分别需要约 33 个和 38 个试点, 其后继续增加试点数没有意义。

2.3 小麦品种试验中重复数和试点数对遗传力增量的影响

依据 2010—2019 年北部冬麦区水地组和旱地组小麦品种试验的单点试验平均信噪比(Q_r)和一年多点试验平均信噪比(Q_c)与重复次数或试点数及遗传力的关系式, 计算在设定区间内与单位增量的重复次数和试点数量相对应的遗传力增量。图 2 表明, (1)水地组和旱地组小麦品种试验重复数和试点数增量对遗传力增量的影响趋势基本一致, 可合并分析。(2)重复次数以 0.2 为单位, 在区间[0,1]中每增加一个单位, 遗传力依次提升 0.30、0.16、0.10、0.07 和 0.05, 当重复次数为 1 时遗传力达到 0.68; 在区间[1,5]中每增加一次重复, 遗传力依次提升 0.13、0.05、0.03

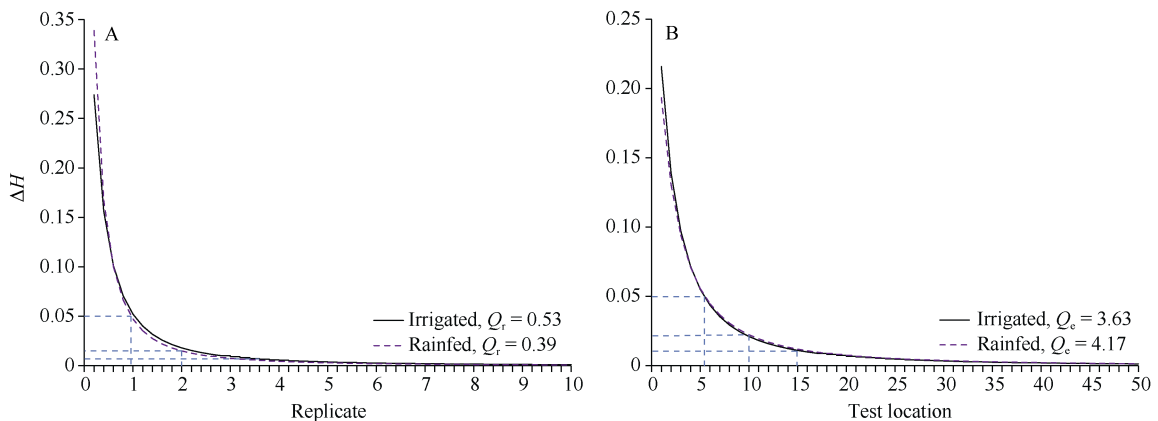


图 2 北部冬麦区小麦品种试验的遗传力增量(ΔH)与单位重复数或试点数的关系

Fig. 2 Relationship between heritability increment (ΔH) and per unit replicates or test location number for regional winter wheat variety trials in Northern winter wheat region

和0.02; 其后继续增加重复数, 遗传力基本不再提升。重复数从1次增加到2次、3次和4次, 遗传力依次从0.68提升到0.81、0.86、0.89和0.91, 可见, 第2次重复的遗传力增量较大, 第3次重复的遗传力增加已经很小, 后续重复数增加对遗传力的提升效应十分微小。(3)试点数以1为单位, 在区间[1,5]中每增加1个试点, 遗传力增量依次为0.20、0.13、0.10、0.07和0.06, 从0.20提高到0.60; 其后继续增加试点数, 遗传力的提升速度减缓, 在试点数区间[6,10]中每增加1个试点约提高遗传力0.02, 在试点数区间[11,15]中每增加1个试点约提高遗传力0.01, 其后试点数增加对遗传力的提升效应较小。试点数从5个增加到10个、15个和20个, 遗传力依次从0.56提升到0.72、0.79和0.84, 后续试点数增加对遗传力的提升效应基本上没有意义。

3 讨论

3.1 小麦品种区域试验效率的评价指标探讨

农作物多环境品种试验(品种区域试验)是客观评价农作物品种的丰产性、稳产性和适应性及生产应用价值必要环节^[10]。作物区域试验的科学性、可靠性和试验效率主要决定于其对品种间差异的鉴别能力, 而鉴别力又决定于试验的精确度^[11]。试验精确度在区域试验质量评价中一直受到广泛关注^[12-16]。试验的精确度主要与试验误差有关, 试验误差越大, 则精确度越低。区域试验中通常用试验误差变异系数(CV, coefficient of error variation)来表示试验的精确度, 并将CV大于15%的单年单点试验数据在汇总报告中剔除。作为更直接的试验对品种鉴别能力的指标, 孔繁玲等^[11]将品种间多重比较时的最小显著差数(least significant difference, LSD)与总体均值的比率称为相对最小显著差数(relative least significant difference, RLSD)作为试验精确度的指标^[17]。然而, 一年多品种区域试验的精确度和有效性不仅受到遗传效应和误差大小的影响, 还受到品种与环境互作效应等因素的影响^[18-20]。一组由多个试验误差变异都很小的单点试验组成一年多品种区域试验并不一定是有效的试验。例如, 2017年北部冬麦区旱地组小麦区域试验中全部9个单点试验中的CV值都在8%以下, 多点联合方差分析的CV值仅为3.8%, 但其试验遗传力却只有0.30。从CV值来看这是一个精确度很好的试验, 而从遗传力来看又是一个“坏试验”, 因为它对品种的鉴别能力太差, 无法分辨品种

间的真实遗传差异。品种与环境互作方差大而遗传方差相对很小是产生这种现象的主要原因。当遗传力接近于0时, 无论品种间表型差异有多大, 基于表型变异的品种选择都是完全无效的^[8]。遗传力表达了试验对品种间遗传差异的鉴别能力和对品种的选择效率, 也就是体现了品种区域试验的效率。在农作物品种多环境试验质量评价体系中除了用CV表达试验的误差控制水平外, 还应当将试验遗传力作为试验有效性的重要评价指标^[5]。Yan等^[6]研究发现 $H = 0.75$ 是比较适当的试验评价标准。许乃银等^[5]研究证实了遗传力保持0.75的水平是我国棉花品种区域试验质量评价比较适合的标准, 但也需要依据具体品种试验发展水平确定其适宜的目标遗传力水平。本研究发现我国北部冬麦区小麦品种试验水地组和旱地组在正常年份的试验遗传力平均分别为0.75和0.68, 同时也考虑到小麦品种区域试验对品种推荐审定和应用十分重要, 每年都可能有部分试验点因为各种异常原因而报废, 为充分保证试验汇总结果的可靠性, 可按遗传力为0.85的水平需求安排试验点数量和重复次数。

3.2 小麦品种区域试验重复次数和试点数量的优化策略

小麦品种区域试验从试验设计、田间管理和试验统计分析等各项工作都是为了提高小麦品种试验的遗传力, 从而提高试验的品种选择效率^[5]。品种多点试验的遗传力受到试验误差、品种与试点互作效应、试点数量和试验重复次数等因素的综合影响。因此, 加强试验田间管理以减少试验误差、开展适当的品种生态区划分以减少品种与环境互作效应、适当增加试验重复次数和试点数量区域试验等措施有利于提高试验遗传力和试验效率。试验遗传力随着重复次数和试点数量增加而提高的速率符合先快后慢的“边际效应递减”规律, 在达到适当的数量后再增加重复次数和试点数量对遗传力的增量贡献很小, 试验效率提高不大。同时, 重复次数和试点数量的增加也意味着试验投入的人力、物力和财力成本的增加, 成本投入对试验效率的提高符合报酬递减规律。因此, 品种区域试验重复次数和试点数量的优化就是依据遗传力随着重复次数和试点数量增加的递增规律, 设计适当的重复次数和试点数量在充分保证试验的可靠性和科学性的前提下又能节省试验成本, 减少不必要的资源浪费。严威凯等^[6]研究指出遗传力达到0.75的水平是试验成本和试验效

率的产投比“拐点”，遗传力大于 0.75 时的试点数量增加对遗传力增量效应将快速衰退。本研究也证实了试验遗传力随着重复次数和试点数的增加表现为先快后慢的曲线关系，遗传力在 0.75 以下时表现为“快速增长期”，在 0.75 和 0.90 期间表现为“缓慢增长期”，在 0.90 之后表现为“增长停滞期”。本研究发现我国北部冬麦区小麦品种试验第 2 次重复的遗传力增量较大，第 3 次重复的遗传力增加已经很小，后续重复数增加对遗传力的提升效应十分微小；试点数从 5 个增加到 10 个、15 个和 20 个，遗传力依次从 0.56 提升到 0.72、0.79 和 0.84，后续试点数增加对遗传力的提升效应基本上没有意义。因此，北部冬麦区小麦品种试验可保持当前的 3 次重复；水地组的试点数量可保持在 11 个左右；旱地组可将试点数增加到 13 个，使遗传力达到 0.75；在条件许可的前提下，旱地组和水地组的试点数可分别增加到 15 个和 17 个，使遗传力达到 0.80 的水平。

4 结论

我国北部冬麦区小麦品种试验采用 3 次重复可以保证试验遗传力和试验效率符合试验质量要求，目前设置的试点数量也可以充分满足区域试验的精确度要求。针对小麦品种试验重复次数和试点数量的优化方案包括，重复次数仍可设计为 3 次；水地组可保持当前 11 个左右的试点数量，旱地组和国家财力、物力和人力等条件许可的情况下，可以将试点数量增加到 13 个左右，从而使北部冬麦区小麦品种试验遗传力达到 0.75 的水平；如需将遗传力提高在 0.80 水平，则需要约 16 个试点；增加的试点数量可与增加重复次数相比较，优先选择增加小区数量较少的方案，有利于节约试验成本。

References

- [1] 胡学旭, 孙丽娟, 周桂英, 吴丽娜, 陆伟, 李为喜, 王爽, 杨秀兰, 宋敬可, 王步军. 2000–2015 年北部、黄淮冬麦区国家区试品种的品质特征. 作物学报, 2017, 43: 501–509.
Hu X X, Sun L J, Zhou G Y, Wu L N, Lu W, Li W X, Wang S, Yang X L, Song J K, Wang B J. Quality characteristics of winter wheat varieties tested in national trials in northern region and Yellow-Huai River valley winter wheat zone from 2000 to 2015. *Acta Agron Sin*, 2017, 43: 501–509 (in Chinese with English abstract).
- [2] 赵广才. 小麦优质高产栽培理论与技术. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2018.
Zhao G C. Good Quality and High Yield Cultivation of Wheat: Theory and Technology. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2018.
- [3] 孟繁圆, 冯利平, 张丰瑶, 张祎, 伍露, 王春雷, 闫锦涛, 彭明喜, 莫志鸿, 余卫东. 北部冬麦区冬小麦越冬冻害时空变化特征. 作物学报, 2019, 45: 1576–1585.
Meng F Y, Feng L P, Zhang F Y, Zhang W, Wu L, Wang C L, Yan J T, Peng M X, Mo Z H, Yu W D. Temporal and spatial variations of winter wheat freezing injury in northern winter wheat region. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 1576–1585 (in Chinese with English abstract).
- [4] 胡学旭, 孙丽娟, 周桂英, 吴丽娜, 陆伟, 李为喜, 王爽, 杨秀兰, 宋敬可, 王步军. 2000–2015 年国家黄淮和北部冬麦区域试验品种品质分析. 中国农业科学, 2016, 49: 4677–4686.
Hu X X, Sun L J, Zhou G Y, Wu L N, Lu W, Li W X, Wang S, Yang X L, Song J K, Wang B J. Quality variation of national tested varieties in northern winter wheat region and Yellow-Huai River valley winter wheat region from 2000 to 2015. *Sci Agric Sin*, 2016, 49: 4677–4686 (in Chinese with English abstract).
- [5] 许乃银, 金石桥, 李健. 我国棉花品种区域试验重复次数和试点数量的设计. 作物学报, 2016, 42: 43–50.
Xu N Y, Jin S Q, Li J. Design of test location number and replicate frequency in the regional cotton variety trials in China. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 43–50 (in Chinese with English abstract).
- [6] Yan W K, Frégeau-Reid J, Martin R, Pageau D, Mitchell-Fetch J. How many test locations and replications are needed in crop variety trials for a target region? *Euphytica*, 2015, 202: 361–372.
- [7] 翟虎渠. 应用数量遗传. 北京: 中国农业出版社, 2001.
Zhai H Q. Applied Quantitative Genetics. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2001 (in Chinese).
- [8] Yan W K. Crop Variety Trials: Data Management and Analysis. Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 2014.
- [9] Yan W K. GGEbiplot-A windows application for graphical analysis of multi-environment trial data and other types of two-way data. *Agron J*, 2001, 93: 1111–1118.
- [10] 许乃银, 李健. 我国棉花品种区域试验精确度的演变分析. 棉花学报, 2016, 28: 34–41
Xu N Y, Li J. Evolution analysis of the precision of regional cotton variety trials in China. *Cotton Sci*, 2016, 28: 34–41 (in Chinese with English abstract).
- [11] 孔繁玲, 张群远, 杨付新, 郭恒敏. 棉花品种区域试验的精确度探讨. 作物学报, 1998, 24: 601–607.
Kong F L, Zhang Q Y, Yang F X, Guo H M. Studies on the precision of regional cotton variety trial. *Acta Agron Sin*, 1998, 24: 601–607 (in Chinese with English abstract).
- [12] 许乃银, 金石桥. 棉花品种区域试验适宜试验点数量的抽样估计. 棉花学报, 2013, 25: 57–62.
Xu N Y, Jin S Q. Sampling estimation of suitable quantity of test sites in cotton variety regional trials. *Cotton Sci*, 2013, 25: 57–62 (in Chinese with English abstract).
- [13] Gouy M, Rousselle Y, Bastianelli D, Lecomte P, Bonnal L, Roques D, Efile J C, Rocher S, Daugrois J, Toubi L, Nabeneza S, Hervouet C, Telismart H, Denis M, Thong-Chane A, Glaszmann J C, Hoarau J Y, Nibouche S, Costet L. Experimental assessment of the accuracy of genomic selection in sugarcane. *Theor Appl Genet*, 2013, 126: 2575–2586.
- [14] Iwata H, Jannink J. Accuracy of genomic selection prediction in barley breeding programs: a simulation study based on the real

- single nucleotide polymorphism data of barley breeding lines. *Crop Sci*, 2011, 51: 1887–1902.
- [15] Kelly A M, Smith A B, Eccleston J A, Cullis B R. The accuracy of varietal selection using factor analytic models for multi-environment plant breeding trials. *Crop Sci*, 2007, 47: 1063–1070.
- [16] Gauch H G, Zobel R W. Accuracy and selection success in yield trial analyses. *Theor Appl Genet*, 1989, 77: 473–481.
- [17] 王洁, 廖琴, 胡小军, 万建民. 北方稻区国家水稻品种区域试验精确度分析. *作物学报*, 2010, 36: 1870–1876.
Wang J, Liao Q, Hu X J, Wan J M. Precision evaluation of rice variety regional trials in Northern China. *Acta Agron Sin*, 2010, 36: 1870–1876 (in Chinese with English abstract).
- [18] Brancourt-Hulmel M, Lecomte C. Effect of environmental variates on genotype \times environment interaction of winter wheat: a comparison of biadditive factorial regression to AMMI. *Crop Sci*, 2003, 43: 608–617.
- [19] Brennan P S, Byth D E, Drake D W, DeLacy I H, Butler D G. Determination of the location and number of test environments for a wheat cultivar evaluation program. *Aust J Agr Res*, 1981, 32: 189–201.
- [20] Imrie B C, Drake D W, Delacy I H, Byth D E. Analysis of genotypic and environmental variation in international mungbean trials. *Euphytica*, 1981, 30: 301–311.