

网络出版时间:2026-01-09

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260109.1347.002

新疆春小麦氮高效品种筛选与氮效率评价

吴定平^{1,2}, 任毅¹, 程宇坤¹, 白斌³, 雷斌⁴, 耿洪伟^{1,2}

(1. 新疆农业大学农学院/新疆农业大学优质专用麦类作物工程技术研究中心/新疆小麦产业体系创新团队, 新疆乌鲁木齐 830052;

2. 丝绸之路经济带作物生物育种联合实验室, 新疆乌鲁木齐 830052; 3. 甘肃省农业科学院小麦研究所, 甘肃兰州 730070;

4. 新疆维吾尔自治区农业科学院, 新疆乌鲁木齐 830091)

摘要:为探索新疆春小麦成熟期氮效率评价方法与指标,筛选氮高效种质资源,以期小麦氮高效品种的选育提供参考。以适宜新疆广泛种植的20个春小麦品种为研究对象,设置0 kg·hm⁻²(N0)、100 kg·hm⁻²(N1)、200 kg·hm⁻²(N2)、300 kg·hm⁻²(N3)共4个施氮水平,测定不同施氮水平下小麦成熟期茎干重、叶干重、穗重、穗粒数、千粒重、籽粒产量、株高、叶绿素含量等11个性状,利用主成分分析法、隶属函数法对小麦品种进行综合评价并划分氮效率类型。结果表明,与N2、N3处理相比,N0、N1处理下小麦成熟期株高降低、茎叶细小且籽粒产量降低;N0、N1处理下多数指标的变异系数均大于N2、N3处理。相关性分析显示,4个施氮水平下茎干重与穗重、穗粒重均呈显著正相关;单位面积穗数与茎干重、穗重、穗粒重、千粒重均呈显著负相关。两年在4个施氮水平下分别提取4个主成分,其累计贡献率为75.63%~82.20%。根据不同氮水平下氮效率综合值(G)的大小将供试小麦品种分为氮高效型、氮低效型、低施氮量氮高效型、高施氮量氮高效型4类。综合氮效率综合值与籽粒产量,筛选出核春137、粮春1242、粮春1354、新春38号、新春47号、新春48号和新春6号共7个高产氮高效型品种。

关键词: 春小麦; 氮肥水平; 品种筛选; 综合评价

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2026)03-0331-12

Screening of High Nitrogen Efficient Varieties and Comprehensive Evaluation of Nitrogen Efficiency in Xinjiang Spring Wheat

WU Dingping^{1,2}, REN Yi¹, CHENG Yukun¹, BAI Bin³, LEI Bin⁴, GENG Hongwei^{1,2}

(1. College of Agronomy / Special High Quality Triticeae Crops Engineering and Technology Research Center, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. Joint Laboratory of Crop Biological Breeding in the Silk Road Economic Belt, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 3. Wheat Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China;

4. Xinjiang Uygur Autonomous Region Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, Xinjiang 830091, China)

Abstract: In order to explore the evaluation methods and indicators of nitrogen efficiency at the maturity stage of spring wheat in Xinjiang and to screen high nitrogen-efficient germplasm resources, providing reference for breeding wheat varieties with high nitrogen-use efficiency, twenty spring wheat varieties widely cultivated in Xinjiang were used as research materials, and four nitrogen fertilizer levels were set up: 0 kg·hm⁻²(N0), 100 kg·hm⁻²(N1), 200 kg·hm⁻²(N2), and 300 kg·hm⁻²(N3). Eleven traits were investigated under different nitrogen levels, such as stem dry weight, leaf dry weight, weight per spike, grain number per spike, grain yield, plant height, and SPAD value of wheat at maturity. Principal component analysis(PCA) and membership function were used to comprehensively evaluate wheat varieties and classify nitrogen efficiency types. The results showed that,

收稿日期:2025-03-11

修回日期:2025-04-17

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B02015-2);自然科学基金杰出青年科学基金项目(2022D01E46);新疆维吾尔自治区青年科技拔尖人才专项(2022TSYCCX0079)

第一作者 E-mail:wdp2025@163.com(吴定平)

通讯作者 E-mail:hw-geng@163.com(耿洪伟)

compared with N2 and N3 treatments, N0 and N1 treatments significantly resulted in reduced plant height during the wheat maturity stage, thinner stems and leaves, and lower grain yield; The coefficients of variation for most traits under N0 and N1 treatments were higher than those under N2 and N3. Correlation analysis showed that stem weight was significantly positively correlated with spike weight and grain weight under the four nitrogen levels, and spike number per unit area was negatively correlated with stem weight, spike weight, grain weight per spike, and 1 000-grain weight. Four principal components were extracted under each nitrogen level across two years, with cumulative contribution rates ranging from 75.63% to 82.20%. Based on the comprehensive nitrogen-use efficiency index(*G* value), the tested wheat varieties were classified into four categories: nitrogen-efficient type, nitrogen-inefficient type, low N fertilizer application nitrogen-efficient type, and high N fertilizer application nitrogen-efficient type. Combining *G* value and grain yield, seven high-yield and nitrogen-efficient varieties were identified, including Hechun 137, Liangchun 1242, Liangchun 1354, Xinchun 38, Xinchun 47, Xinchun 48, and Xinchun 6.

Key words: Spring wheat; Nitrogen fertiliser levels; Variety selection; Comprehensive evaluation

小麦(*Triticum aestivum* L.)是中国仅次于玉米和水稻的第三大粮食作物^[1]。根据统计,2018—2022年新疆春小麦平均播种面积达32.634万hm²,占新疆小麦总播种面积的29.93%,年均产量达到180.06万t,占新疆粮食总产量的11.03%。小麦高产稳产对农业生产安全可持续发展至关重要。氮素是作物生长所必需的主要营养元素之一^[2],不合理的氮素供应会对植株生长产生不利影响^[3-4]。目前,中国氮肥施用量约占全球总量的31.0%^[5],平均利用效率仅为30.0%~41.0%^[6-7],损失量高达50.0%^[8]。近年来,新疆粮食单产水平位居中国前列,但化肥施用量整体偏高。2023年新疆粮食产量与氮肥施用量较1987年分别增加2.6倍和6.35倍,氮肥施用量增速是粮食产量增速的2.44倍^[9]。过量施氮不仅增加生产成本,还会导致资源浪费和环境污染。因此,筛选氮高效利用的品种是减少资源浪费、降低农业生产成本的有效途径。

目前,氮高效品种已经在小麦^[10]、玉米^[11]、油菜^[12]、棉花^[13]等作物的生产中广泛利用。已有研究表明,氮高效基因型油菜在表型性状、生理活性、光合特性方面显著优于氮低效基因型^[14];Liang等^[15]比较了低氮条件下25种木薯的产量和氮素积累差异,筛选出氮高效敏感的基因型SC10和两种氮低效不敏感的基因型SC205和GR5;杨豫龙等^[16]提出穗粒数、穗粒重和干物质积累量可以作为筛选氮高效玉米品种的重要指标。在氮高效小麦的研究中,发现不同氮效率的小麦品种在灌浆时间、灌浆速率和千粒重上存在明显差

异^[17];氮高效品种在不施氮条件下,依然具有较高的净光合速率,保证了其稳定的氮肥利用效率和产量^[18]。主成分分析等综合评价方法可以消除利用单一指标筛选氮高效品种的局限性。张子豪等^[19]采用主成分分析和聚类分析等方法从34个小麦品种中筛选出7个稳定的氮高效型品种;孟自力等^[18]从14个小麦品种中筛选出3个高产氮高效型品种。然而,已有研究多基于单一或有限氮肥水平,缺乏对多个施氮梯度下氮效率的系统评价。新疆作为中国春小麦的主产区,普遍存在施氮量大、利用率低、土壤板结、肥力下降等问题,但针对新疆春小麦氮高效品种筛选鲜有报道。本研究设置4个施氮水平,利用变异系数、隶属函数法、主成分分析等方法,对20个新疆春小麦品种进行氮效率类型划分,为春小麦氮高效品种选育筛选种质资源,并探索更加适用于小麦的氮高效品种的筛选方法。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2023年4月至7月、2024年4月至7月在乌鲁木齐市新疆农业大学陆港校区(87°21'E,43°56'N)进行。该地春小麦生长季降水量约90 mm,平均气温21℃,累计日照时间1 155 h。试验土壤为砂质土,前茬作物为小麦,2023年和2024年播前0~20 cm土壤有机质含量分别为27.15、26.10 g·kg⁻¹,全氮含量分别为1 095.5、1 047.5 mg·kg⁻¹,速效磷含量分别为16.8、18.6 mg·kg⁻¹,速效钾含量分别为292.0、286.5 mg·

kg⁻¹, pH 值分别为 8.20、8.18。

1.2 试验设计

田间试验采用裂区设计,以施氮水平为主区,品种为副区,设置 0(N₀)、100(N₁)、200(N₂)和 300 kg·hm⁻²(N₃)共 4 个施氮水平,供试小麦品种是新疆维吾尔自治区近年审定或主栽的 20 个常规春小麦品种,分别为核春 137(A₁)、粮春 1242(A₂)、粮春 1354(A₃)、新春 51 号(A₄)、新春 11 号(A₅)、新春 26 号(A₆)、新春 37 号(A₇)、新春 38 号(A₈)、新春 40 号(A₉)、新春 42 号(A₁₀)、新春 43 号(A₁₁)、新春 44 号(A₁₂)、新春 46 号(A₁₃)、新春 47 号(A₁₄)、新春 48 号(A₁₅)、新春 6 号(A₁₆)、核春 614(A₁₇)、核春 615(A₁₈)、宁春 16 号(A₁₉)、垦春 1803(A₂₀),每处理 3 个重复。总施氮量的 1/3 作为底肥施用,其余 2/3 作为追肥施用(拔节期:孕穗期:扬花期=4:3:3)。磷肥(P₂O₅ 12%)和钾肥(K₂O 60%)的施用量均为 225 kg·hm⁻²,作为底肥一次性施入。小麦于每年的 4 月 5 日左右利用自走式小麦小区条播机播种,7 月 20 日左右小区联合收割机收获,生育期浇水量为 20 m³·hm⁻²,播种量为 2.6 万粒·hm⁻²。每个小区种植 6 行,行距 20 cm,行长 2 m,小区面积 2.4 m²。其他田间种植措施同一般大田管理措施。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 农艺性状的测定

成熟期每小区随机选取 5 株小麦,测定株高(plant height, PH)、穗长(spike length, SL);选取有代表性的 0.3 m²(0.5 m×0.6 m)小麦,测定单位面积有效穗数(effective panicle number per unit area, EPNU);小麦成熟后,每小区选取 10 个主穗室内考种,测定穗重(weight per spike, WPS)、穗粒重(grain weight per spike, GWPS)、穗粒数(grain number per spike, GNPS);小区收获后,测定千粒重(thousand kernel weight, TKW)和籽粒产量(grain yield, GY)。

1.3.2 叶绿素含量测定

于成熟期,每个小区随机选取 10 株小麦,使用 SPAD-502 叶绿素仪测定旗叶中部 SPAD 值。

1.3.3 干物质及氮含量的测定

于成熟期,每个小区选取 10 株小麦,剪去根部并去除植株表面和基部杂质,将植株分为茎秆、叶片和穗 3 个部分。将各器官置于 105 ℃ 恒温烘箱杀青 30 min 转 80 ℃ 烘干至恒重,用电子天平

分别称取茎干重(stem dry weight, SDW)、叶干重(leaf dry weight, LDW)。籽粒、茎叶粉碎后过 0.5 mm 筛,用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后,使用 FOSS (Kjeltec 8400)凯式定氮仪测定全氮含量。按以下公式计算氮素积累量、氮肥农学效率(NAE)、氮肥回收效率(NUR)、氮肥生理效率(NPE)和氮收获指数(NHI)。

氮素积累量=成熟期器官干重×成熟期器官氮素含量

氮肥农学效率=(施氮区籽粒产量-不施氮区籽粒产量)/施氮量

氮肥回收效率=(施氮区植株氮积累量-不施氮区植株氮积累量)/施氮量×100%

氮肥生理效率=(施氮区籽粒产量-不施氮区籽粒产量)/(施氮区植株氮素积累量-不施氮区植株氮素积累量)

氮收获指数=籽粒氮素积累量/成熟期植株氮素积累量×100%

1.3.4 主成分分析

使用 SPSS 22.0 对每个性状指标的原始数据进行标准化处理,然后进行主成分分析,选择特征值大于 1 的主成分,确定主成分个数(n),计算每个主成分内各指标的综合指标值($F_i, i=1, 2, \dots, n$)。以特征向量为权重构建主成分的得分表达式综合指标。

$F_1 = a_{11}Z_{X1} + a_{21}Z_{X2} + \dots + a_{q1}Z_{Xq}, F_2 = a_{12}Z_{X1} + a_{22}Z_{X2} + \dots + a_{q2}Z_{Xq}, F_i = a_{1i}Z_{X1} + a_{2i}Z_{X2} + \dots + a_{qi}Z_{Xq}$ 。其中 $a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{qi} (i=1, \dots, n)$ 为 X 的特征值所对应的特征向量, Z_{Xq} 为第 q 个性状指标标准化后的值。

1.3.5 氮效率综合值计算

首先计算每个品种各综合指标值 F_i 对应的隶属函数值 μ_i 和权重 W_i ,最后计算每个品种的氮效率综合值 G 。

$$W_i = P_i / \sum_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

$$\mu_i = (F_i - F_{\min}) / (F_{\max} - F_{\min}) \quad (2)$$

$$G = \sum_{i=1}^n \mu_i W_i \quad (3)$$

式中, P_i 为第 i 个综合指标贡献率, $F_{\max}$ 和 $F_{\min}$ 分别是综合指标的最大值和最小值, μ_i 为第 i 个综合指标的隶属函数, W_i 为第 i 个综合指标的权重。

1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2016 进行数据整理和图表绘制;

采用 Origin 2021 和 cnsknowall 平台进行热图绘制;采用 SPSS 22.0 软件进行主成分分析,并利用 Duncan’s 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 施氮水平对小麦成熟期农艺性状的影响

2023 和 2024 年 20 个春小麦品种成熟期的 11 个指标在不同施氮水平下存在不同程度的响应,其中 SPAD、株高、穗粒数、穗重、有效穗数随施氮量增加呈现增长趋势,而茎干重和穗长呈现先增长后降低的趋势(表 1)。与 N2、N3 处理相比,N0、N1 处理小麦株高、穗长、茎干重、叶干重、穗粒数以及籽粒产量均降低。两年所有处理各指标的变异系数为 3.79%~36.52%。两年 N0、N1 处理下茎干重、叶干重、穗粒重、籽粒产量、穗重、穗长等指标的变异系数均大于 N2、N3 处理,表明低氮处理可让品种间的变异愈发显著,更加适用于

氮高效品种的筛选。两年 4 个氮水平下各指标的平均变异系数大小依次均为叶干重(28.85%)、穗粒重(20.95%)、穗重(19.31%)、茎干重(18.81%)、穗粒数(13.26%)、籽粒产量(12.54%)、单位面积有效穗(9.78%)、穗长(9.02%)、千粒重(7.91%)、株高(6.14%)、SPAD(4.65%),其中叶干重、穗粒重、穗重、茎干重、穗粒数、籽粒产量的变异系数均大于 10%,说明供试品种间表型差异明显,遗传多样性较丰富,对氮素响应差异显著。

2.2 不同施氮水平下小麦成熟期农艺性状间的相关性

对小麦的 11 个指标进行相关性分析,结果表明,2023 和 2024 年所有处理小麦茎干重与穗重均呈显著正相关($P<0.05$)。N1 处理下茎干重与穗重、穗粒重、株高、SPAD 呈显著正相关,穗重、穗粒重、穗粒数两两呈显著正相关。N2 处理下穗粒重与穗重、穗粒数均呈显著正相关。N3 处理

表 1 不同施氮水平下小麦品种成熟期各指标的变异系数

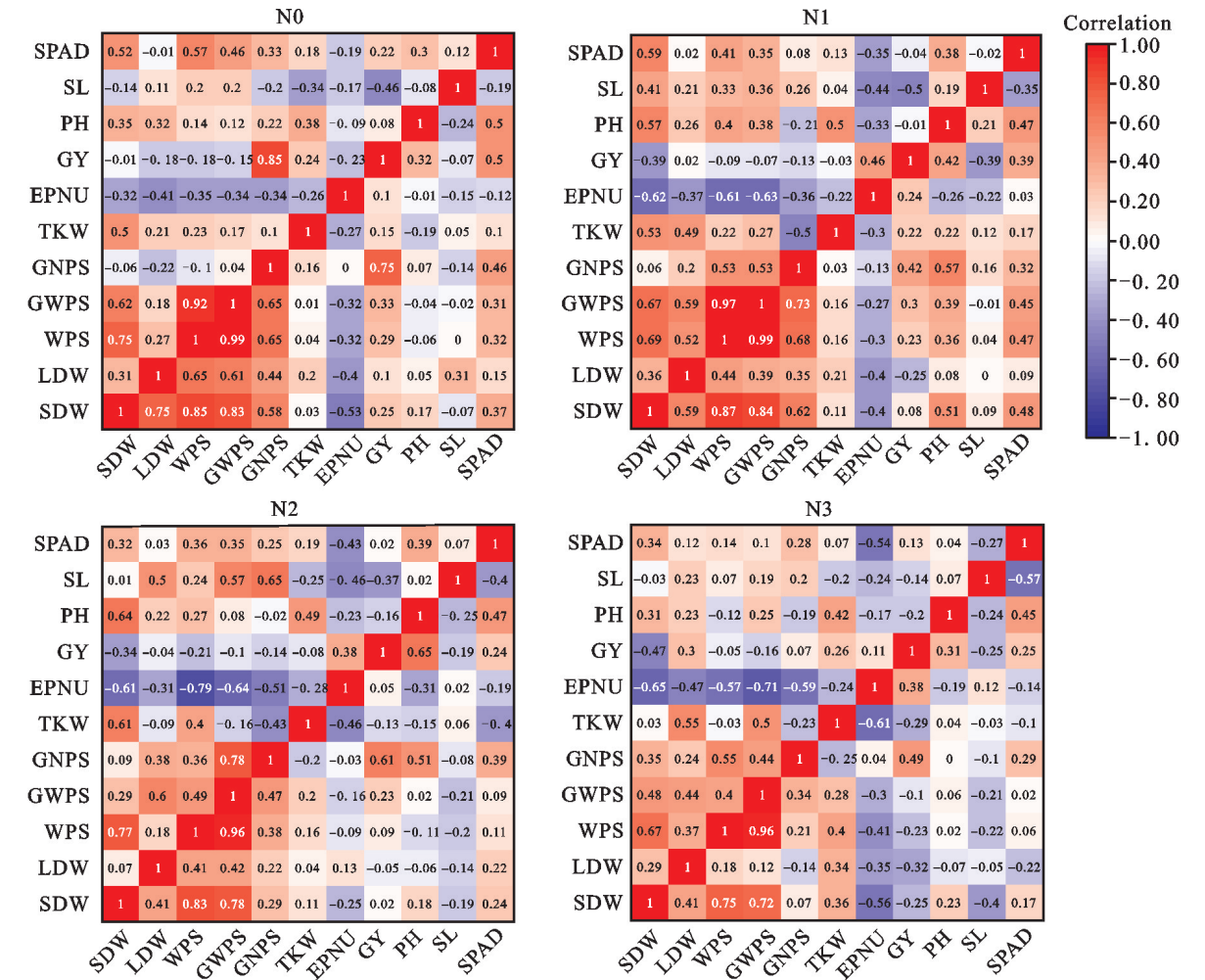
Table 1 Variation statistics of 11 traits at maturity stage of 20 wheat varieties under different nitrogen levels

年份 Year	指标 Index	N0			N1			N2			N3		
		变异范围 Variation	均值 Mean	变异系数 CV/%	变异范围 Variation	均值 Mean	变异系数 CV/%	变异范围 Variation	均值 Mean	变异系数 CV/%	变异范围 Variation	均值 Mean	变异系数 CV/%
2023	SDW/g	0.33~1.03	0.67	21.77	0.44~0.94	0.71	17.56	0.54~1.22	0.83	19.41	0.51~1.05	0.78	14.70
	LDW/g	0.02~0.23	0.12	33.76	0.03~0.22	0.13	36.52	0.07~0.21	0.13	29.84	0.07~0.21	0.14	27.25
	WPS/g	1.11~2.93	2.31	16.46	1.46~3.32	2.52	15.74	1.81~3.56	2.68	15.26	1.95~3.47	2.66	13.74
	GWPS/g	0.78~2.29	1.76	17.08	1.14~2.60	1.94	16.46	1.23~2.66	2.01	15.52	1.34~2.88	2.05	17.29
	GNPS	29~43	35.37	10.06	32~54	42.45	12.70	34~57	45.13	12.85	36~60	47.92	11.42
	TKW/g	31.63~49.30	40.84	10.01	35.17~51.78	43.64	8.46	35.67~58.86	46.19	8.87	39.83~55.88	48.20	7.78
	EPNU/ (spikes · m ⁻²)	313~457	367.93	9.17	330~470	392.41	9.97	343~510	418.84	10.63	363~540	456.30	10.21
	GY/ (kg · hm ⁻²)	3 818.7~6 627.2	5 446.7	12.81	6 067.1~9 117.2	7 339.7	9.13	6 233.4~9 870.0	7 845.5	10.45	6 916.4~10 491.0	8 542.2	9.88
	PH/cm	54.80~77	65.98	8.20	60.08~77.9	68.61	6.31	63.50~82.14	72.23	6.54	62.46~86.00	73.73	6.28
	SL/cm	5.50~8.96	7.37	11.20	6.20~9.50	7.66	10.06	6.52~10.46	8.52	10.12	6.60~9.64	7.92	8.63
2024	SPAD	50.10~58.61	53.61	3.90	50.28~60.22	55.58	3.85	51.03~59.76	55.63	4.14	50.85~59.82	56.43	3.79
	SDW/g	0.44~1.23	0.79	21.33	0.44~1.25	0.84	19.86	0.66~1.36	0.89	16.49	0.57~1.39	0.87	19.36
	LDW/g	0.04~0.22	0.13	30.61	0.07~0.26	0.16	25.23	0.11~0.31	0.20	22.21	0.08~0.24	0.16	25.39
	WPS/g	0.93~3.51	2.06	29.96	0.91~3.74	2.11	26.31	1.64~3.19	2.22	17.50	1.50~3.25	2.31	19.49
	GWPS/g	0.69~2.53	1.50	31.82	0.64~2.86	1.52	29.04	0.98~2.41	1.62	19.63	0.97~2.54	1.68	20.79
	GNPS	20~32	25.35	11.49	23~43	30.65	15.52	27~48	35.98	16.38	32~59	40.7	15.67
	TKW/g	35.55~52.78	45.47	7.58	42.36~54.67	48.19	5.58	44.34~56.47	50.68	6.85	40.23~57.01	48.87	8.11
	EPNU/ (spikes · m ⁻²)	264~491	381.80	10.73	375~522	430.78	8.31	390~579	457.83	9.35	405~649	510.43	9.88
	GY/ (kg · hm ⁻²)	3 479.7~6 470.4	4 718.4	16.44	3 838.8~7 126.2	5 582.1	14.62	5 134.7~9 465.5	6 487.5	14.22	5 137.5~9 454.7	6 800.7	12.79
	PH/cm	60.48~79.92	70.50	5.60	64.82~78.86	70.73	4.99	69.10~88.18	76.72	5.62	66.50~85.76	77.65	5.59
	SL/cm	6.32~8.80	7.80	7.28	6.90~10.28	8.05	9.22	7.00~10.00	8.69	8.15	6.70~10.02	8.54	7.51
	SPAD	42.90~54.10	49.37	5.90	42.80~55.30	49.52	5.89	46.10~55.90	51.06	4.74	48.00~59.50	53.61	5.01

下茎干重与单位面积穗数呈显著负相关。

综合两年结果,所有处理茎干重与穗重、穗粒重、千粒重、株高、SPAD 均存在正相关性或显著正相关性,表明茎叶干物质积累状况与籽粒形成密切相关,其积累水平在小麦生长过程中持续影响穗重及千粒重。单位面积穗数与茎干重、穗重、

穗粒重、千粒重、株高均存在负相关或显著负相关性,说明随着单位面积穗数增加,单株可获得的养分相对减少,单穗质量降低,最终导致千粒重下降。在不同的氮肥水平下,各农艺性状间的相关性存在差异,因此筛选氮高效小麦品种时需综合考虑多性状指标。



每个矩形左上角代表 2023 年的相关系数,右下角代表 2024 年的相关系数。
The upper left corner of each rectangle represents the correlation coefficient for 2023 and the lower right corner represents the correlation coefficient for 2024.

图 1 不同施氮水平下小麦成熟期各指标的相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis between wheat traits at maturity under different nitrogen levels

2.3 不同施氮水平下小麦成熟期农艺性状的主成分分析

对两年 20 份春小麦成熟期的 11 个指标进行主成分分析(表 2),根据主成分因子特征值大于 1 的原则,从所有处理中提取 4 个主成分,其累计贡献率为 75.63%~82.20%,能够较好地代表小麦 11 个指标的大部分信息。

由各主成分综合指标的系数可以得出,2023 年 4 个施氮水平中决定主成分 1 的相同指标有茎干重、穗重、穗粒重、单位面积穗数;决定主成分 2 的相同指标有千粒重,各载荷系数的绝对值均大于 0.5;决定主成分 3 的主要指标有籽粒产量。2024 年 4 个施氮水平中决定主成分 1 的相同指标有茎干重、穗重、穗粒重;决定主成分 2 的相同

表 2 2023 年和 2024 年不同施氮水平下 4 个主成分的载荷系数及贡献率
Table 2 Factor loadings and contribution rates of the four principal components under different nitrogen levels in 2023 and 2024

年份 Year	指标 Index	N0				N1				N2				N3			
		PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
2023	SDW	0.80	0.36	0.13	-0.24	0.85	0.27	-0.23	-0.17	0.66	0.65	-0.11	0.02	0.82	-0.13	0.10	-0.39
	LDW	0.36	0.35	-0.52	0.47	0.58	0.21	0.25	0.61	0.58	-0.43	0.17	-0.16	0.53	0.57	-0.09	0.45
	WPS	0.95	-0.10	0.11	-0.09	0.92	-0.15	0.25	0.04	0.77	0.34	-0.05	-0.23	0.69	-0.26	0.15	0.17
	GWPS	0.88	-0.17	0.18	-0.02	0.92	-0.14	0.26	0.14	0.81	-0.42	0.14	-0.05	0.83	0.16	-0.18	0.10
	GNPS	0.56	-0.80	0.15	0.04	0.62	-0.72	0.23	0.03	0.57	-0.74	0.06	0.25	0.64	-0.52	0.14	0.19
	TKW	0.32	0.78	-0.13	-0.32	0.37	0.83	-0.14	0.29	0.22	0.86	0.19	-0.29	0.27	0.85	-0.08	0.02
	EPNU	-0.55	-0.10	0.50	-0.21	-0.73	0.20	0.18	0.22	-0.85	-0.11	0.18	0.30	-0.88	-0.06	-0.14	-0.08
	GY	-0.31	0.15	0.55	0.64	-0.14	0.22	0.85	-0.06	-0.19	-0.19	0.87	-0.35	-0.50	0.49	0.43	0.45
	PH	0.28	0.60	0.11	0.43	0.57	0.52	-0.08	-0.16	0.44	0.51	0.22	0.41	0.25	0.55	-0.37	-0.57
	SL	0.28	-0.64	-0.41	0.30	0.50	-0.32	-0.52	0.26	0.59	-0.52	-0.22	-0.10	0.22	-0.20	-0.67	0.42
2024	SPAD	0.64	0.06	0.47	0.14	0.51	0.19	0.09	-0.74	0.50	0.19	0.35	0.58	0.36	0.17	0.77	-0.12
	特征值 Eigen value	3.84	2.33	1.33	1.13	4.65	1.85	1.34	1.20	3.95	2.80	1.12	0.95	3.86	2.03	1.48	1.15
	贡献率 Contribution rate/%	34.91	21.21	12.12	10.24	42.31	16.80	12.19	10.89	35.91	25.49	10.15	8.66	35.05	18.48	13.46	10.46
	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	34.91	56.12	68.24	78.48	42.31	59.11	71.31	82.20	35.91	61.40	71.55	80.21	35.05	53.52	66.98	77.45
	SDW	0.91	-0.16	-0.28	0.05	0.91	-0.19	-0.18	0.05	0.81	-0.36	-0.03	-0.12	0.90	0.11	-0.01	-0.15
	LDW	0.74	-0.41	-0.02	0.12	0.51	-0.52	-0.34	-0.29	0.49	-0.27	0.40	-0.18	0.45	-0.41	-0.16	-0.35
	WPS	0.91	-0.18	-0.10	-0.26	0.92	-0.06	-0.21	0.07	0.82	-0.49	0.12	0.09	0.87	0.09	0.39	0.04
	GWPS	0.91	-0.15	-0.11	-0.28	0.92	0.02	-0.19	0.10	0.86	-0.40	0.04	0.18	0.80	0.19	0.51	0.07
	GNPS	0.79	0.32	0.33	-0.26	0.80	0.10	0.07	0.39	0.68	0.41	0.06	0.39	0.07	0.61	0.54	0.12
	TKW	0.17	-0.17	0.73	0.48	0.27	-0.09	0.54	-0.67	0.02	-0.55	-0.66	0.11	0.61	-0.36	-0.27	0.32
2024	EPNU	-0.42	0.48	0.17	-0.59	-0.38	0.61	-0.19	0.32	-0.23	0.08	0.86	0.26	-0.72	0.17	0.35	-0.26
	GY	0.51	0.60	0.44	-0.05	0.34	0.80	0.26	-0.06	0.44	0.63	-0.10	0.47	-0.34	0.72	0.09	0.17
	PH	0.16	0.63	-0.42	0.47	0.64	0.18	0.56	0.15	0.41	0.73	-0.37	0.02	0.17	0.51	-0.54	0.42
	SL	-0.02	-0.54	0.27	0.09	0.04	-0.61	0.55	0.48	-0.39	-0.22	-0.05	0.57	-0.35	-0.59	0.31	0.55
	SPAD	0.52	0.57	-0.02	0.35	0.58	0.50	-0.07	-0.24	0.48	0.54	0.08	-0.53	0.15	0.74	-0.40	-0.10
	特征值 Eigen value	4.41	1.99	1.20	1.16	4.49	1.98	1.24	1.12	3.58	2.35	1.51	1.15	3.59	2.42	1.47	0.85
	贡献率 Contribution rate/%	40.11	18.12	10.90	10.54	40.84	18.02	11.31	10.15	32.52	21.35	13.73	10.48	32.61	21.96	13.36	7.70
	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	40.11	58.22	69.13	79.67	40.84	58.86	70.17	80.31	32.52	53.86	67.59	78.07	32.61	54.57	67.93	75.63
	SDW	0.91	-0.16	-0.28	0.05	0.91	-0.19	-0.18	0.05	0.81	-0.36	-0.03	-0.12	0.90	0.11	-0.01	-0.15
	LDW	0.74	-0.41	-0.02	0.12	0.51	-0.52	-0.34	-0.29	0.49	-0.27	0.40	-0.18	0.45	-0.41	-0.16	-0.35
	WPS	0.91	-0.18	-0.10	-0.26	0.92	-0.06	-0.21	0.07	0.82	-0.49	0.12	0.09	0.87	0.09	0.39	0.04
	GWPS	0.91	-0.15	-0.11	-0.28	0.92	0.02	-0.19	0.10	0.86	-0.40	0.04	0.18	0.80	0.19	0.51	0.07
	GNPS	0.79	0.32	0.33	-0.26	0.80	0.10	0.07	0.39	0.68	0.41	0.06	0.39	0.07	0.61	0.54	0.12
	TKW	0.17	-0.17	0.73	0.48	0.27	-0.09	0.54	-0.67	0.02	-0.55	-0.66	0.11	0.61	-0.36	-0.27	0.32
	EPNU	-0.42	0.48	0.17	-0.59	-0.38	0.61	-0.19	0.32	-0.23	0.08	0.86	0.26	-0.72	0.17	0.35	-0.26
	GY	0.51	0.60	0.44	-0.05	0.34	0.80	0.26	-0.06	0.44	0.63	-0.10	0.47	-0.34	0.72	0.09	0.17
	PH	0.16	0.63	-0.42	0.47	0.64	0.18	0.56	0.15	0.41	0.73	-0.37	0.02	0.17	0.51	-0.54	0.42
	SL	-0.02	-0.54	0.27	0.09	0.04	-0.61	0.55	0.48	-0.39	-0.22	-0.05	0.57	-0.35	-0.59	0.31	0.55
	SPAD	0.52	0.57	-0.02	0.35	0.58	0.50	-0.07	-0.24	0.48	0.54	0.08	-0.53	0.15	0.74	-0.40	-0.10
	特征值 Eigen value	4.41	1.99	1.20	1.16	4.49	1.98	1.24	1.12	3.58	2.35	1.51	1.15	3.59	2.42	1.47	0.85
	贡献率 Contribution rate/%	40.11	18.12	10.90	10.54	40.84	18.02	11.31	10.15	32.52	21.35	13.73	10.48	32.61	21.96	13.36	7.70
	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	40.11	58.22	69.13	79.67	40.84	58.86	70.17	80.31	32.52	53.86	67.59	78.07	32.61	54.57	67.93	75.63

指标有籽粒产量、SPAD,各载荷系数的绝对值均大于 0.5;决定主成分 3 的相同指标有千粒重。两年 4 个施氮水平决定主成分 4 的主要指标有穗长、株高、SPAD,其与前 3 个主成分反映的信息有部分重叠。这 4 个主成分能够较好地概括小麦氮肥响应特征,可作为氮素高效品种筛选与综合评价的重要依据。

2.4 隶属函数分析与小麦类型划分

2.4.1 不同施氮水平下小麦氮效率的划分

基于主成分分析所得的综合指标,采用隶属函数法进行计算,并结合各主成分的权重,求得每个品种在不同施氮水平下的氮效率综合值(G),再采用最大距离法对 G 值进行聚类分析(图 2)。根据 G 值大小对新疆春小麦品种进行氮效率类型划分,其中 $G > 0.5$ 为氮高效型, $G < 0.5$ 为氮低效型^[20]。但不同品种在不同施氮水平下 G 值存在一定差异,因此参考高新等^[21]的方法将小麦氮效率类型划分为 4 类:除了 N_0 处理外的其他处理下 $G > 0.5$ 为氮高效型;在全部施氮水平下 $G < 0.5$ 为氮低效型;在 N_0 和 N_1 (低施氮量)处理下 G 的均值大于 N_2 和 N_3 (高施氮量)处理为低施氮量氮高效型;在 N_0 和 N_1 处理下 G 的均值小于 N_2 和 N_3 处理为高施氮量氮高效型。因此,2023 年氮高效型品种包括 A1、A2、A8、A11、A12、A14;氮低效型包括 A5、A7、A10、A17、

A19、A20;低施氮量氮高效型包括 A9、A15、A16、A18;高施氮量氮高效型包括 A3、A4、A6、A13。2024 年氮高效型仅为 A2,氮低效型包括 A6、A11、A13、A17、A19、A20,低施氮量氮高效型包括 A1、A3、A8、A14、A15、A16、A18,高施氮量氮高效型包括 A4、A5、A7、A9、A10、A12。不同施氮水平下,各小麦品种氮效率的 G 值表现出明显的类型分化,说明品种间对氮素利用的响应差异较大。

2.4.2 基于籽粒产量的小麦氮效率类型划分

为从籽粒产量角度进一步验证和完善小麦氮效率类型的划分,将 N_0 处理的籽粒产量分别与 N_1 、 N_2 、 N_3 处理做散点图(图 3)。在 N_1 处理下,氮高效型和低氮高效型的籽粒产量普遍高于氮低效型和高氮高效型,随着施氮量的增加,不同类型小麦的籽粒产量均呈上升趋势,但在 N_3 处理下,氮高效型和高氮高效型的籽粒产量高于氮低效型。以籽粒产量的均值为分界线,把 20 个小麦品种划分为 4 个类型:高低施氮量均高产型(I)、高施氮量高产型(II)、高低施氮量均低产型(III)和低施氮量高产型(IV)。依据每个品种在 2~3 个施氮量下一致的分类结果,确定其最终籽粒产量类型。在两年的分类结果中多数品种属于 I、III 和 IV 型,其中 A8、A15 在两年中均为 I 型,A5、A7、A10 均为 II 型,A4、A13、A19 均为 III 型,A20 为 IV 型。

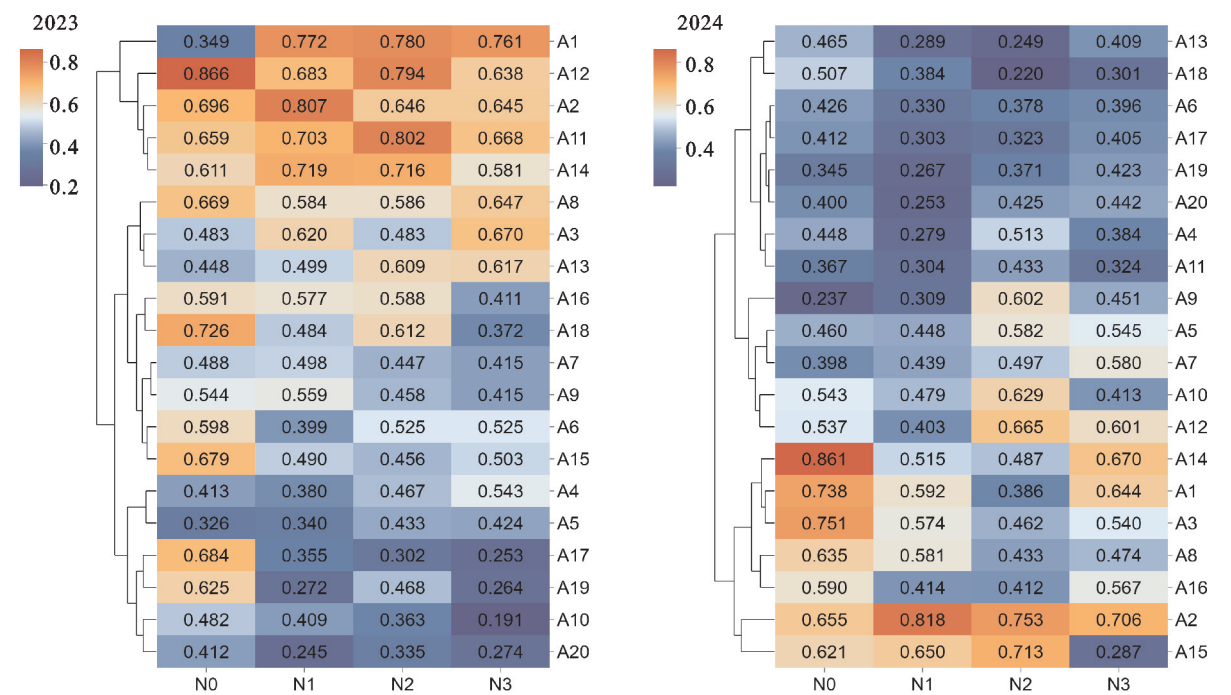


图 2 不同施氮水平下各小麦品种氮效率综合值(G)的聚类图

Fig. 2 Cluster diagram of the comprehensive value G of each wheat cultivar under different nitrogen levels

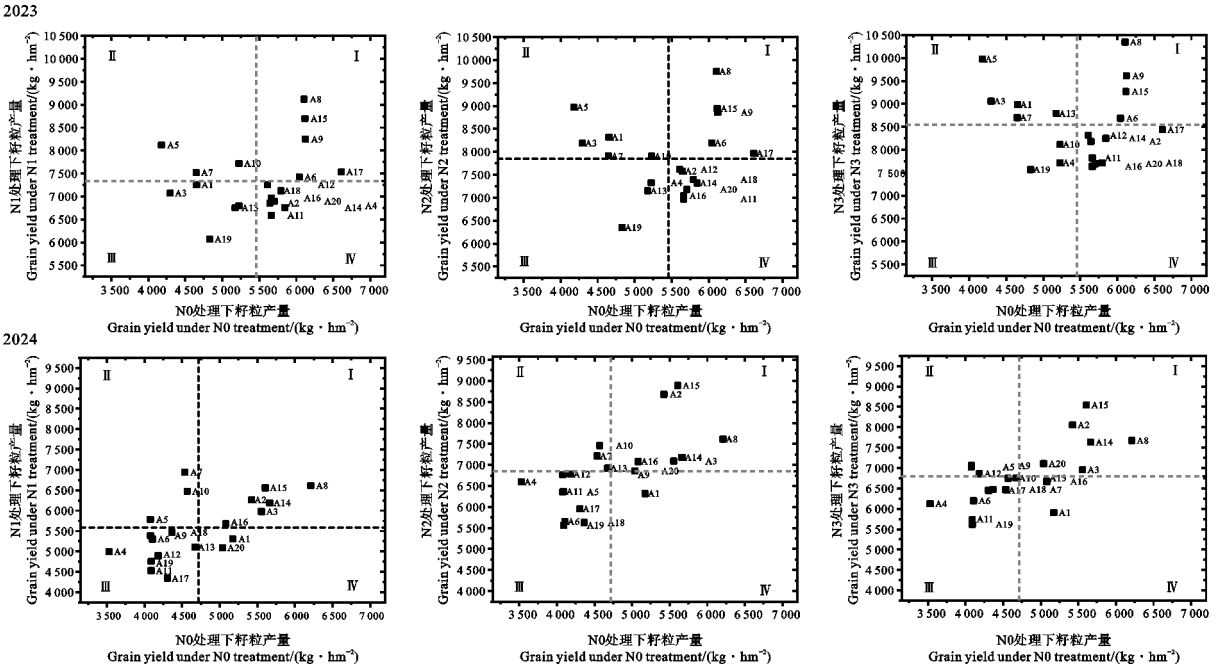


图 3 不同施氮水平下小麦籽粒产量的散点图
Fig. 3 Scatter plots of wheat grain yield under different nitrogen levels

为综合评估氮效率与产量表现,将氮效率类型重组为氮高效型(氮高效型、低施氮量氮高效型、高施氮量氮高效型)和氮低效型,将籽粒产量类型重组为高产型(I、II、IV)和低产型(III),综合每个品种两年的 G 值和籽粒产量的分类情况,将 20 个品种分为高产氮高效型、高产氮低效型、低产氮高效型、

低产氮低效型(表 3)。在两年的分类结果中,A1(核春 137)、A2(粮春 1242)、A3(粮春 1354)、A8(新春 38 号)、A14(新春 47 号)、A15(新春 48 号)、A16(新春 6 号)均为高产氮高效型,A20(垦春 1803)为高产氮低效型,A4(新春 51 号)为低产氮高效型,A19(宁春 16 号)为低产氮低效型。

表 3 小麦氮效率氮与产量的综合分类

Table 3 Comprehensive classification of wheat nitrogen efficiency and grain yield

年份 Year	高产氮高效型 High-yielding and nitrogen-efficient type	高产氮低效型 High-yielding and nitrogen-inefficient type	低产氮高效型 Low-yielding and nitrogen-efficient type	低产氮低效型 Low-yielding and nitrogen-inefficient type
2023	A1、A2、A3、A6、A8、A9、A11、A12、A14、 A15、A16、A18	A5、A7、A10、A17、A20	A4、A13	A19
2024	A1、A2、A3、A5、A7、A8、A10、A14、A15、A16	A20	A4、A9、A12	A6、A11、A13、 A17、A18、A19
两年共有 Both, years	A1、A2、A3、A8、A14、A15、A16	A20	A4	A19

2.5 不同氮效率与产量类型小麦氮素积累与氮肥利用效率的差异

对本研究划分的高产氮高效型、高产氮低效型、低产氮高效型、低产氮低效型 4 类小麦两年氮肥利用效率的平均值进行分析(表 4)。结果表明,不同类型小麦的籽粒氮素积累量、地上部氮素积累量均随着施氮量的增加而增加,其中高产氮高效型小麦的籽粒氮素积累量、地上部氮素积累

量在 N1、N2、N3 处理下均高于其他 3 种类型小麦。不同类型小麦的氮肥农学利用效率、氮肥回收利用效率、氮肥生理利用效率均随着施氮量的增加而逐渐降低。氮高效型小麦的氮肥农学利用率、氮肥回收利用效率在 N1、N2、N3 处理下均高于氮低效型小麦,高产氮高效型小麦的氮肥回收利用效率在 N1、N2、N3 处理下显著高于高产氮低效型。

表 4 不同类型小麦氮素积累与氮肥利用效率的差异

Table 4 Differences in nitrogen accumulation and nitrogen use efficiency among different types of wheat

氮水平 Nitrogen levels	类型 Types	籽粒氮积累量 Grain nitrogen accumulation/ (kg·hm ⁻²)	地上部氮积累量 Nitrogen accumulation in the shoots/ (kg·hm ⁻²)	氮肥农学 利用效率 NAE/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥回收 利用效率 NUR/%	氮肥生理 利用效率 NPE/ (kg·kg ⁻¹)	氮收获指数 NHI/%
N1	高产氮高效型 HYHNE	175.93±8.79a	198.17±12.37a	19.79±5.06a	69.75±12.98a	29.11±1.32a	88.91±1.17a
	高产氮低效型 HYLNE	150.02±15.65a	163.98±16.6a	11.73±0.27a	35.11±1.53c	33.46±2.23a	91.47±0.28a
	低产氮高效型 LYHNE	156.29±34.35a	176.34±34.97a	18.18±3.48a	55.86±5.98ab	32.4±2.75a	88.44±1.94a
	低产氮低效型 LYLNE	152.72±23.78a	170.32±27.02a	11.04±1.88a	48.67±2.57bc	22.61±2.67b	89.69±0.27a
N2	高产氮高效型 HYHNE	197.57±9.37a	224.61±10.76a	11.36±1.85a	48.10±5.69a	23.96±1.33b	88.06±0.08a
	高产氮低效型 HYLNE	162.67±9.93a	181.07±9.09b	9.14±1.80a	26.09±4.53b	34.93±0.86a	89.82±0.98a
	低产氮高效型 LYHNE	187.63±13.94a	211.84±17.26ab	12.36±4.24a	45.68±11.84ab	26.75±2.33b	88.6±0.64a
	低产氮低效型 LYLNE	167.90±21.04a	190.82±18.82ab	7.88±0.62a	34.59±2.82ab	22.78±0.09b	87.87±2.36a
N3	高产氮高效型 HYHNE	217.18±33.3a	249.98±42.24a	8.98±4.17a	40.52±14.28a	21.44±2.95a	87.00±1.41ab
	高产氮低效型 HYLNE	196.87±28.14a	214.48±27.12a	6.76±0.19a	28.54±3.01b	23.84±3.16a	91.69±1.53a
	低产氮高效型 LYHNE	199.33±28.73a	237.23±40.40a	8.48±0.25a	38.92±0.19a	21.78±0.53a	84.22±2.23b
	低产氮低效型 LYLNE	196.01±50.83a	221.06±52.27a	7.10±2.86a	33.14±9.27ab	21.03±2.75a	88.43±2.09ab

同列数据后不同字母表示同一施氮量下不同类型小麦间差异显著($P<0.05$)。

Different letters after the values within the same columns indicate significant differences among different types of wheat under the same nitrogen level($P<0.05$). HYHNE: High yield and high nitrogen efficiency; HYLNE: High yield and low nitrogen efficiency; LYHNE: Low yield and high nitrogen efficiency; LYLNE: Low yield and low nitrogen efficiency.

3 讨论

3.1 施氮水平对小麦农艺性状的影响

高产是小麦育种的核心目标,然而受限于耕地土壤基础肥力不足,大量施肥尤其是过量施用氮肥成为保障小麦高产的主要措施。但过量施氮对小麦籽粒产量等指标的提升有限,甚至还会抑制籽粒产量等指标的增长^[22]。本研究发现,小麦各指标在 N2 和 N3 处理下的均值明显高于 N0 和 N1 处理,随着施氮量的增加,茎干重、穗长、籽粒产量等指标趋于稳定或表现出先增后减的趋势,这与胡斌等^[23]、王立艳等^[24]的多项研究结果相符。而通过变异情况分析,在 N0 和 N1 处理下绝大多数指标的变异系数明显高于 N2 和 N3 处理,说明较低的氮水平扩大了品种之间的遗传差异性,有利于氮高效品种的筛选,这与在芝麻上的研究结果一致^[25]。此外,在 N1 处理下,氮高效型和低施氮量氮高效型的籽粒产量普遍高于高施氮量氮高效和氮低效型,随着施氮量的增加,高施氮量氮高效型的籽粒产量逐渐增高并超越氮低效

型,这与徐晴等^[26]的研究结果相符。

3.2 施氮水平对小麦氮素吸收利用效率的影响

合理施用氮肥可以促进小麦叶片中叶绿素的合成,提高光合效率,有利于氮素在叶片等营养器官中的积累,从而为小麦的生长储备更多的能量和物质^[27]。小麦生育中后期的氮素吸收、转运以及积累是提升小麦产量与氮素利用效率的关键要素。本研究通过比较不同氮水平下小麦成熟期对氮肥的吸收利用情况,发现不同类型小麦的籽粒氮素积累量、地上部氮素积累量均随着施氮量的增加而增加,氮肥农学利用效率、氮肥回收利用效率、氮肥生理利用效率均随着施氮量的增加而逐渐降低,这与王慧等^[28]的研究结果一致。通过对本研究划分的小麦进行氮效率比较,氮高效型小麦的氮肥农学利用效率、氮肥回收利用效率在 N1、N2、N3 处理下均高于氮低效型小麦;高产氮高效型小麦的氮肥回收利用效率在 N1、N2、N3 处理下均显著高于高产氮低效型,低产氮低效型的氮肥生理利用率在 N1 处理显著低于其他 3 种类型,这与王英等^[29]在水稻上的研究结果一致,

说明氮高效型小麦在氮素的吸收与利用方面较氮低效型小麦具有显著优势。

3.3 小麦氮效率类型划分

当前,作物氮高效评价方法与指标不一。鉴于不同作物在各个生育时期对氮素的响应程度不同,通常选择苗期^[30]、扬花期^[31]、成熟期^[32]作为筛选氮高效品种的最佳时期,多以籽粒产量、生物学干重^[33]等作为筛选氮高效品种的关键指标。陈旭等^[34]采用最大距离法对氮效率综合值进行聚类分析,将供试的18个小麦品种划分为氮高效型、氮中效型和氮低效型。本研究根据不同氮水平下小麦G值的大小将供试小麦品种分为氮高效型、氮低效型、低施氮量氮高效型、高施氮量氮高效型4种氮效率类型,其中在2024年的划分结果中新春43为氮低效型、新春48为低施氮量氮高效型、核春137为高施氮量氮高效型,这与高新等^[21]的研究结果一致。籽粒产量是小麦育种的重要参考指标,也是评价小麦氮利用效率不可忽视的指标。因此,本研究结合籽粒产量与G值进一步将供试小麦分为4类,筛选出7个高产氮高效型品种。此分类方法兼顾了籽粒产量与氮高效综合值,更适用于小麦的氮效率类型划分。但个别品种G值和氮效率类型划分在两年的波动较大,其在第一年为氮高效型,在第二年为低施氮量氮高效型或氮低效型,这种波动可能与大田试验两年的外界环境、地块局部基础肥力变化有关,具体的变化机制仍需多年多点试验结果加以验证。

3.4 高产氮高效品种的筛选与适应性评价

在不同地区和年份种植时,同一品种的产量及其构成因素会存在差异^[35]。本研究通过综合评价籽粒产量和氮效率综合值G,筛选出7个籽粒高产且氮高效利用的品种,分别是核春137、粮春1242、粮春1354、新春38号、新春47号、新春48号和新春6号。其中,核春137和新春48号的氮高效利用特性已在高新等^[21]的研究中得到证实。本研究通过两年种植并增加供试品种数量,从新疆主栽的春小麦中进一步筛选出粮春1242等氮高效利用品种。这些品种多为2010年后审定,株形紧凑,普遍抗锈病、白粉病,并且产量突出,适宜在新疆的昌吉州、塔城等多地种植。本试验筛选到的高产氮高效品种粮春1242、粮春1354,在2021年示范田中产量分别达到10 759.05、10 697.7 kg·hm⁻²,均刷新了新疆春小麦单产纪录,推广面积也在逐年攀升^[36]。这些品种同时具

备高产和氮高效利用的双重优势,其在新疆乃至全国春麦区的推广前景广阔,可助力新疆小麦产业提质增效。

4 结论

本研究利用主成分分析、隶属函数分析等方法,综合氮效率综合值与籽粒产量的分析结果,将20份新疆春小麦材料划分为高产氮高效型、高产氮低效型、低产氮高效型、低产氮低效型4类,在两年分类结果中,高产氮高效型品种(核春137、粮春1242、粮春1354、新春38号、新春47号、新春48号和新春6号)在两年试验中表现稳定,兼具高产与氮高效利用特征,可以作为春小麦氮高效育种的种质资源。

参考文献:

- [1]高欣,郭雷,单宝雪,等.淀粉颗粒类型及其比例在小麦品质特性形成与改良中的作用[J].作物学报,2023,49(6):1448.
GAO X, GUO L, SHAN B X, et al. Types and ratios of starch granules in grains and their roles in the formation and improvement of wheat quality properties [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(6):1448.
- [2]宋腾钊,毛培钧,杨瑞鹏,等.小麦TaCLC-e-3AL基因功能分析及互作蛋白鉴定[J].植物营养与肥料学报,2024,30(5):836.
SONG T Z, MAO P J, YANG R P, et al. Functional analysis of TaCLC-e-3AL and the identification of interacting proteins in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(5):836.
- [3]ZHAO D L, REDDY K R, KAKANI V G, et al. Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis, and hyperspectral reflectance properties of sorghum [J]. *European Journal of Agronomy*, 2005, 22(4):392.
- [4]LI Z Y, XU B, DU T H, et al. Excessive nitrogen fertilization favors the colonization, survival, and development of *Sogatella furcifera* via bottom-up effects [J]. *Plants*, 2021, 10(5):875.
- [5]李梦然,许学慧,赵萌莉.不同形态氮肥对苗期玉米镉富集的影响[J].中国土壤与肥料,2021(4):289.
LI M R, XU X H, ZHAO M L. Effects of different forms of nitrogenous fertilizer on cadmium accumulation in seedling stage of maize (*Zea mays* L.) [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(4):289.
- [6]徐富锦,常会庆.污泥堆肥替代氮肥对石灰性褐土肥力、小麦产量和品质的影响[J].生态与农村环境学报,2022,38(11):1483.
XU F J, CHANG H Q. Effects of sludge composting to replace nitrogen fertilizer on cinnamon soil fertility, yield and quality of wheat [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(11):1483.

- [7]夏龙, 逆超普, 朱春梧, 等. 中国粮食生产的温室气体减排策略以及碳中和实现路径[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1282.
XIA L L, TI C P, ZHU C W, *et al.* Mitigation strategies of greenhouse gas emissions from crop production in China and the pathways to agricultural carbon neutrality [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(5): 1282.
- [8]庄振东, 李絮花. 腐植酸氮肥对玉米产量、氮肥利用及氮肥损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1233.
ZHUANG Z D, LI X H. Effects of humic acid nitrogen fertilization on corn yield, nitrogen utilization and nitrogen loss [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(5): 1233.
- [9]杨世琦. 基于国家粮食安全下的农业面源污染防治体系思考[J]. 中国农业科学, 2022, 55(17): 3382.
YANG S Q. Thought of pollution comprehensive prevention and control system of non-point sources based on national food security [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(17): 3382.
- [10]赵瑞, 张旭辉, 张程炆, 等. 小麦种质资源成株期氮效率评价及筛选[J]. 中国农业科学, 2021, 54(18): 3818.
ZHAO R, ZHANG X H, ZHANG C Y, *et al.* Evaluation and screening of nitrogen efficiency of wheat germplasm resources at mature stage [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(18): 3818.
- [11]王帅丽, 穆心愿, 杨豫龙, 等. 供氮水平对不同氮效率玉米品种氮素吸收、干物质形成及产量的影响[J]. 玉米科学, 2023, 31(4): 118.
WANG S L, MU X Y, YANG Y L, *et al.* Effects of nitrogen supply levels on nitrogen uptake, dry matter production and yield of maize varieties with different nitrogen efficiency [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2023, 31(4): 118.
- [12]朱佳荣, 代文君, 李浩, 等. 甘蓝型油菜越冬期与成熟期氮效率的评价与鉴定[J]. 植物遗传资源学报, 2024, 25(12): 2094.
ZHU J R, DAI W J, LI H, *et al.* Evaluation and identification of nitrogen efficiency of *Brassica napus* L. at overwintering and maturity stages [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2024, 25(12): 2094.
- [13]段松江, 木丽迪尔·拜波拉提, 彭增莹, 等. 海岛棉氮高效品种筛选与氮效率综合评价[J]. 作物杂志, 2024(2): 62.
DUAN S J, BAI BO LA TI M L D E, PENG Z Y, *et al.* Screening of nitrogen high-efficiency varieties and comprehensive evaluation of nitrogen efficiency of sea island cotton [J]. *Crops*, 2024(2): 62.
- [14]邹小云, 官梅, 官春云. 甘蓝型油菜氮素高效吸收的植株形态与生理特性研究[J]. 作物杂志, 2022(5): 97.
ZOU X Y, GUAN M, GUAN C Y. Studies on plant morphological and physiological characteristics of high nitrogen absorption in *Brassica napus* L [J]. *Crops*, 2022(5): 97.
- [15]KANG L, LIANG Q Y, JIANG Q, *et al.* Screening of diverse cassava genotypes based on nitrogen uptake efficiency and yield [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(4): 965.
- [16]杨豫龙, 赵霞, 王帅丽, 等. 黄淮海中南部玉米氮高效品种筛选及产量性状分析[J]. 玉米科学, 2022, 30(1): 23.
YANG Y L, ZHAO X, WANG S L, *et al.* Screening and yield character analysis of maize nitrogen efficient varieties in south and central Huang-Huai-Hai area [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30(1): 23.
- [17]宋晓, 张珂珂, 岳克, 等. 不同氮效率小麦品种的籽粒灌浆特性[J]. 中国土壤与肥料, 2024(3): 174.
SONG X, ZHANG K K, YUE K, *et al.* Grain filling characteristics of wheat varieties with different nitrogen efficiency [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2024(3): 174.
- [18]孟自力, 朱伟, 朱倩, 等. 小麦氮高效品种的筛选及评价[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(13): 52.
MENG Z L, ZHU W, ZHU Q, *et al.* Screening and evaluation of nitrogen-efficient wheat cultivars [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(13): 52.
- [19]张子豪, 李想成, 吴昊天, 等. 基于主成分和聚类分析筛选氮高效小麦品种[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(5): 513.
ZHANG Z H, LI X C, WU H T, *et al.* Screening of wheat cultivars with high nitrogen efficiency using principal component analysis and cluster analysis [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2022, 48(5): 513.
- [20]张恒, 陈艳琦, 任杰莹, 等. 西南麦区小麦苗期氮高效品种筛选及指标体系构建[J]. 四川农业大学学报, 2022, 40(1): 14.
ZHANG H, CHEN Y Q, REN J Y, *et al.* Screening of wheat cultivars with high nitrogen efficiency at seedling stage and construction of index system in southwest wheat region [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2022, 40(1): 14.
- [21]高新, 张跃强, 李剑峰, 等. 新疆春小麦品种氮效率类型的鉴定[J]. 分子植物育种, 2024, 22(12): 3974.
GAO X, ZHANG Y Q, LI J F, *et al.* Identification of nitrogen efficiency types of spring wheat varieties in Xinjiang [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2024, 22(12): 3974.
- [22]师箴, 高斯曼, 李彤, 等. 施氮量对不同叶绿素含量小麦生长、产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(9): 1140.
SHI Z, GAO S M, LI T, *et al.* Effect of nitrogen application rate on growth yield and quality of wheat with different chlorophyll content [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(9): 1140.
- [23]胡斌, 孙可心, 李林, 等. 不同施氮处理对冬小麦产量及氮肥利用率相关指标的影响[J]. 山东农业科学, 2020, 52(10): 123.
HU B, SUN K X, LI L, *et al.* Effects of different nitrogen application on related traits of yield and nitrogen fertilizer efficiency of winter wheat [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2020, 52(10): 123.
- [24]王立艳, 高伟, 李明悦, 等. 不同氮肥用量对小麦产量及氮素利用的影响[J]. 天津农业科学, 2021, 27(1): 22.

- WANG L Y, GAO W, LI M Y, *et al.* Effects of different nitrogen application rates on wheat yield and nitrogen use efficiency [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2021, 27(1): 22.
- [25] 张鹏钰, 高桐梅, 苏小雨, 等. 芝麻苗期氮高效品种筛选及氮效率评价体系建立[J]. 河南农业科学, 2022, 51(6): 57.
- ZHANG P Y, GAO T M, SU X Y, *et al.* Screening of nitrogen efficient varieties and construction of nitrogen efficiency assessment system at seedling stage of sesame (*Sesamum indicum* L.) [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(6): 57.
- [26] 徐 晴, 许甫超, 董 静, 等. 小麦氮素利用效率的基因型差异及相关特性分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(14): 2655.
- XU Q, XU F C, DONG J, *et al.* Genotypic difference of nitrogen use efficiency of wheat and correlation analysis of the related characters [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(14): 2655.
- [27] 云 菲, 杨永锋, 马一琼, 等. 氮钾肥配施对烤烟生长发育及氮组分积累的影响[J]. 烟草科技, 2022, 55(12): 16.
- YUN F, YANG Y F, MA Y Q, *et al.* Effects of combined application of nitrogen and molybdenum fertilizers on growth and nitrogen component accumulation of flue-cured tobacco [J]. *Tobacco Science & Technology*, 2022, 55(12): 16.
- [28] 王 慧, 刘大同, 朱冬梅, 等. 氮肥调控对稻茬晚播小麦产量、品质及氮素利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(7): 876.
- WANG H, LIU D T, ZHU D M, *et al.* Effects of nitrogen regulation on yield, quality and nitrogen use of late-sowing wheat after rice stubble [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(7): 876.
- [29] 王 英, 马建森, 王 芳, 等. 引黄灌区水稻氮高效品种筛选评价[J]. 中国稻米, 2025, 31(1): 75.
- WANG Y, MA J S, WANG F, *et al.* Screening and evaluation of nitrogen-efficient varieties of rice in the yellow river irrigation area [J]. *China Rice*, 2025, 31(1): 75.
- [30] 王汉霞, 马巧云, 单福华, 等. 不同氮效率小麦品种苗期相关指标的杂种优势[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(4): 443.
- WANG H X, MA Q Y, SHAN F H, *et al.* Heterosis of indices related to nitrogen metabolism in wheat varieties with different nitrogen efficiency at seedling stage [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(4): 443.
- [31] 丁永刚, 汤小庆, 梁 鹏, 等. 减氮对不同氮效率小麦品种花后光合物质生产力和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(4): 491.
- DING Y G, TANG X Q, LIANG P, *et al.* Effect of reduced nitrogen application on post-anthesis photosynthetic production and grain yield of wheat cultivars with various nitrogen use efficiency [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(4): 491.
- [32] 海阔北, 彭超军, 李 艳, 等. 高氮与低氮处理对不同氮效率小麦根系及相关生理特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(6): 698.
- HAI C B, PENG C J, LI Y, *et al.* Effect of high and low nitrogen treatments on roots and related physiological characteristics of wheat with different nitrogen efficiency [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(6): 698.
- [33] 商春悦, 兰 倩, 邓玉峰, 等. 不同驯化阶段谷子对氮胁迫的生理响应及耐低氮综合评价[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(10): 1657.
- SHANG C Y, LAN Q, DENG Y F, *et al.* Comprehensive evaluation of physiological responses and low nitrogen tolerance of foxtail millet at different domestication stages [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(10): 1657.
- [34] 陈 旭, 杨习文, 李 文, 等. 不同氮素利用效率小麦苗期的根系形态数量性状分析[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(2): 177.
- CHEN X, YANG X W, LI W, *et al.* Analysis on morphological and quantitative seedling root traits of cultivars with different nitrogen use efficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(2): 177.
- [35] 邱贵兰, 李 燕, 岩罕温龙, 等. 不同生态条件混合选择对4个玉米群体综合农艺性状的改良效果研究[J]. 玉米科学, 2024, 32(8): 7.
- QIU G L, LI Y, YAN H W L, *et al.* Improvement effect of mixed selection under different ecological conditions on comprehensive agronomic traits of four maize populations [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2024, 32(8): 7.
- [36] 王晓春, 张小龙, 艾合买提·哈里克, 等. 春小麦粮春1242滴灌高产栽培技术[J]. 农村科技, 2024(5): 14.
- WANG X C, ZHANG X L, HA LI KE A H M T, *et al.* High-yield cultivation techniques of spring wheat Liangchun 1242 by drip irrigation [J]. *Rural Science & Technology*, 2024(5): 14.