

DOI: 10.11686/cyxb2022011

<http://cyxb.magtech.com.cn>

王珊珊, 谷海涛, 谢慧芳, 等. 113份饲草型六倍体小黑麦种质饲草产量与品质性状的评价. 草业学报, 2023, 32(1): 192—202.

WANG Shan-shan, GU Hai-tao, XIE Hui-fang, *et al.* Evaluation of forage yield and quality traits of 113 forage hexaploid triticale germplasm lines. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(1): 192—202.

113份饲草型六倍体小黑麦种质饲草产量与品质性状的评价

王珊珊, 谷海涛, 谢慧芳, 何绍冬, 甘长波, 卫小勇, 孔广超*

(石河子大学农学院, 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832000)

摘要: 种质资源是遗传研究与作物改良的基础。饲草产量与品质是决定饲草型小黑麦品种利用价值的重要指标。本研究以113份国内外小黑麦种质为材料, 通过2年田间种植, 对其饲草产量与品质性状进行了分析与评价。结果表明参试小黑麦种质的饲草产量及其品质性状存在极显著差异, 其单株鲜草产量分别为36.000~111.560 g与36.310~159.780 g, 单株干草产量分别为12.000~27.000 g与9.150~30.150 g, 鲜干比分别为2.380~4.370与2.610~6.210, 饲草粗蛋白含量分别为6.894%~13.259%与6.680%~14.304%, 饲草中性洗涤纤维含量分别为48.480%~74.850%与53.850%~67.980%, 酸性洗涤纤维含量分别为26.600%~42.780%与29.000%~39.280%, 饲草的相对饲用价值分别为69.650~128.150与79.840~113.170。饲草产量与品质性状的多样性指数范围为1.974~2.075。主成分分析表明, 饲草纤维品质因子、饲草产量因子与综合品质因子为前3个主成分, 其累计贡献率为82.198%。依据单株干草产量、粗蛋白含量及相对饲用价值可将这113份种质聚为三类, 即高产优质种质17份、产量较低品质较优种质50份以及中间类型种质46份。可见供试小黑麦种质饲草产量与品质性状遗传变异丰富, 为饲草型小黑麦育种与遗传改良奠定了基础。

关键词: 小黑麦; 饲草; 产量; 品质; 主成分分析

Evaluation of forage yield and quality traits of 113 forage hexaploid triticale germplasm lines

WANG Shan-shan, GU Hai-tao, XIE Hui-fang, HE Shao-dong, GAN Chang-bo, WEI Xiao-yong, KONG Guang-chao*
Agricultural College of Shihezi University, Key Laboratory of Oasis Ecological Agriculture of Xinjiang Production and Construction Crops, Shihezi 832000, China

Abstract: Germplasm are important resources in genetic improvement and breeding, and forage yield and quality are key characteristics for triticale (*×Triticosecale* Wittmack) varieties for animal feeds. In this study, 113 triticale cultivars from 15 countries were planted in two years, and their forage yields and quality traits (fresh forage weight per plant, dry forage weight per plant, fresh-dry ratio, forage crude protein content, neutral detergent fiber content, acid detergent fiber content and relative feed value) were investigated and a comprehensive index of these traits was evaluated. It was found that forage yield and quality traits of the tested triticale germplasm lines differed significantly between cultivars and years. In two consecutive years, the range of values for measured traits was: fresh forage weight per plant, 36.000—111.560 g and 36.310—159.780 g; dry forage weight per plant, 12.000—27.000 g and

收稿日期: 2022-01-06; 改回日期: 2022-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860376)资助。

作者简介: 王珊珊(1995—), 女, 甘肃张掖人, 在读硕士。E-mail: 854748531@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: kgch001@126.com

9.150—30.150 g; fresh-dry ratio, 2.380—4.370 and 2.610—6.210; forage crude protein content 6.894%—13.259% and 6.680%—14.304%; forage neutral detergent fiber content, 48.480%—74.850% and 53.850%—67.980%; forage acid detergent fiber content, 26.600%—42.780% and 29.000%—39.280%; and forage relative feed value, 69.650—128.150 and 79.840—113.170. The comprehensive index for the seven tested traits ranged from 1.974 to 2.075. The forage fiber quality factor, forage yield factor and comprehensive quality factor were the three most important principal components, with eigenvalues of 1.894, 1.618 and 1.419, respectively. These three principal components explained 82.198% of total data variation. Based on the dry forage weight per plant, crude protein content, and relative feed value, the 113 triticale germplasm lines could be placed into three groups: a higher forage yield and better forage quality group with 17 cultivars, a lower forage yield and good forage quality group with 50 cultivars, and an intermediate-yield and quality group with 46 cultivars. These results indicate that the 113 tested triticale germplasm lines exhibited rich genetic variation in yield and quality traits, which will facilitate forage triticale breeding and genetic improvement.

Key words: triticale; forage; yield; hay quality; principal component analysis

随着我国畜牧业的发展,对高产优质饲草的需求日益增多。优质饲草的缺乏成了限制集约化养殖业发展的因素之一^[1]。小黑麦($\times$ *Triticosecale* Wittmack)是由小麦属(*Triticum*)和黑麦属(*Secale*)经人工有性杂交,染色体加倍培育而成的新作物^[2],具有籽粒产量高、品质优、抗寒、抗病、适应性广的优点^[3-5],同时,小黑麦的生物产量优势也非常明显,其生物量高于小麦(*Triticum aestivum*)和黑麦草(*Secale cereale*)^[6-8],被广泛用作饲草作物来种植。小黑麦饲草的营养品质优良、适口性好,为牲畜喜食^[9],已成为我国重要的饲料作物之一。

在小黑麦的生长发育过程中,随着刈割时期的推迟,其饲草产量变化较大,一般在扬花后 10 d 刈割的饲草产量较高^[10]。同时,在开花期、灌浆期与乳熟期刈割的小黑麦饲草产量与营养品质均显著高于燕麦(*Avena sativa*)^[11],其饲草粗蛋白(crude protein, CP)含量也显著高于黑麦,中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)含量显著低于黑麦^[11]。自营养生长期开始,随着小黑麦生育进程推进,饲草的 CP 含量有所降低,粗纤维含量升高^[10]。NDF 和 ADF 含量也是评定小黑麦饲草营养品质的重要指标,开花期的小黑麦饲草的 NDF 平均含量为 57.35%,ADF 平均含量为 34.52%^[11]。不同小黑麦品种间,其饲草产量与品质性状差异较大^[12]。

选育饲草产量高、品质优良的小黑麦品种是饲草型小黑麦当前育种的主要目标。种质资源是新品种培育的基础和关键。尽管前人对小黑麦品种适应性、刈割期、不同区域小黑麦的饲草产量与品质特性等方面做了大量研究^[6,10-14],但在大量饲草型小黑麦种质的综合评价方面仍较少。Kuleung 等^[15]曾通过 SSR 标记对美国农业部种质库中 80 份小黑麦种质的遗传多样性进行了评价,认为其遗传多样性为 0.07~0.86,平均为 0.54。王瑞清等^[14]对石河子大学麦类作物研究所育成的 59 份春性六倍体小黑麦的饲草产量等性状进行了评价,认为这些小黑麦种质资源变异丰富。

本研究拟对国内外 113 份冬性饲草型小黑麦种质资源的单株鲜草产量(fresh forage weight per plant, FW)、单株干草产量(dry forage weight per plant, DW)、鲜干比(fresh-dry ratio, FDR)、CP 含量、NDF 含量、ADF 含量及相对饲用价值(relative feed value, RFV)进行分析评价,明确其遗传多样性,以为小黑麦品种改良提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

113 份冬性六倍体小黑麦种质中包括国内品种(系)39 份,国外种质 74 份(表 1),主要来自俄罗斯、美国、瑞典、阿根廷、保加利亚、波兰、德国、加拿大、罗马尼亚、日本、瑞士、乌克兰、西班牙和匈牙利。

表 1 供试饲草型小黑麦种质名称及来源

Table 1 The name and source of the tested forage triticale germplasm

编号 No.	品种 Variety	来源 Source	编号 No.	品种 Variety	来源 Source
1	B-4081	阿根廷 Argentina	58	CXST-56/212	瑞典 Sweden
2	Presto	保加利亚 Bulgaria	59	Triticale C	瑞典 Sweden
3	Pshero 16	保加利亚 Bulgaria	60	Triticale H	瑞典 Sweden
4	LT 259/72	波兰 Poland	61	Triticale L	瑞典 Sweden
5	LT 344/72	波兰 Poland	62	Triticale N	瑞典 Sweden
6	Kiskum	波兰 Poland	63	Triticale P	瑞典 Sweden
7	Lasko	波兰 Poland	64	Triticale R	瑞典 Sweden
8	Ugo	波兰 Poland	65	Hybrid 46-131	瑞士 Switzerland
9	Riebesel 47/51	德国 Germany	66	Odesskij Kormovoj	乌克兰 Ukraine
10	Riebesel 47/52	德国 Germany	67	ADL 2	乌克兰 Ukraine
11	Salzmunder Bartweizen	德国 Germany	68	AD 19	乌克兰 Ukraine
12	Riebesel 48	德国 Germany	69	Zitnica 1	乌克兰 Ukraine
13	8A221	德国 Germany	70	Dneprovskij	乌克兰 Ukraine
14	71/2956	俄罗斯 Russia	71	NAD-762-7	乌克兰 Ukraine
15	223/845	俄罗斯 Russia	72	Triticale 9	西班牙 Spain
16	38	俄罗斯 Russia	73	6TA386	匈牙利 Hungary
17	539/1549	俄罗斯 Russia	74	20	匈牙利 Hungary
18	Wheatgrass Hybrid 599	俄罗斯 Russia	75	WH10-4	中国 China
19	AD 114	俄罗斯 Russia	76	WH11-4	中国 China
20	NAD 236	俄罗斯 Russia	77	WH13-4	中国 China
21	1 AD 545	俄罗斯 Russia	78	中饲 1048 Zhongsi 1048	中国 China
22	2 AD 325	俄罗斯 Russia	79	WH08-2	中国 China
23	Spontanyi Kanova 1185	俄罗斯 Russia	80	WH12-1	中国 China
24	Oktoploid Derzhavina	俄罗斯 Russia	81	WH12-2	中国 China
25	STNIISM-1	俄罗斯 Russia	82	WH12-4	中国 China
26	71-1795	俄罗斯 Russia	83	WH14-2	中国 China
27	PRAO 6/1	俄罗斯 Russia	84	NTH1933	中国 China
28	Kazanskij 4	俄罗斯 Russia	85	石大 1 号小黑麦 Shida No. 1 triticale	中国 China
29	Oktoploid Derzhavina	俄罗斯 Russia	86	WH17-1	中国 China
30	PRAO-5/2	俄罗斯 Russia	87	WH17-2	中国 China
31	Stavropol'skij I	俄罗斯 Russia	88	WH17-3	中国 China
32	PRAG-119	俄罗斯 Russia	89	WH17-4	中国 China
33	8A-91	加拿大 Canada	90	WH17-5	中国 China
34	TF 2	罗马尼亚 Romania	91	中饲 237 Zhongsi 237	中国 China
35	6TA203	美国 America	92	冀饲 3 号 Jisi No. 3	中国 China
36	Morrison	美国 America	93	中饲 1257 Zhongsi 1257	中国 China
37	M85-7050	美国 America	94	中饲 1877 Zhongsi 1877	中国 China
38	Eve	美国 America	95	NTH1888	中国 China
39	Mammoth	美国 America	96	中饲 1640 Zhongsi 1640	中国 China
40	KT941276pb003	美国 America	97	甘农 2 号 Gannong No. 2	中国 China
41	6TA131	美国 America	98	冀饲 2 号 Jisi No. 2	中国 China
42	AM 2147	美国 America	99	NTH2736	中国 China
43	OK 78828	美国 America	100	WOH939	中国 China
44	8A-148	美国 America	101	牧乐 3000 Mule 3000	中国 China

续表 Continued Table

编号 No.	品种 Variety	来源 Source	编号 No.	品种 Variety	来源 Source
45	Newcale	美国 America	102	中饲 3297 Zhongsi 3297	中国 China
46	Breaker	美国 America	103	中饲 2712 Zhongsi 2712	中国 China
47	Gaucha	美国 America	104	甘农 C6 Gannong C6	中国 China
48	Triti-Gold 22	美国 America	105	甘农 C10 Gannong C10	中国 China
49	UCRTCL2-2001	美国 America	106	甘农 C23 Gannong C23	中国 China
50	UCRTCL3-2002	美国 America	107	4 鉴 34 4 jian 34	中国 China
51	KT941256h003	美国 America	108	5 鉴 54 5 jian 54	中国 China
52	KT941256h3066	美国 America	109	5 鉴 2 5 jian 2	中国 China
53	Salmon	日本 Japan	110	AMYP	中国 China
54	18	日本 Japan	111	ADMII	中国 China
55	87	日本 Japan	112	5 鉴 64 5 jian 64	中国 China
56	Triticale A	瑞典 Sweden	113	5 鉴 50 5 jian 50	中国 China
57	Amphydiploid O	瑞典 Sweden			

1.2 田间试验设计

分别于 2018—2019 年和 2019—2020 年将参试种质种植于石河子大学试验站。该站位于天山北麓、准噶尔盆地南缘,北纬 44°17′,东经 86°03′,海拔 461 m。该地属于典型的大陆性气候,干旱少雨,年降水量为 206.0 mm,年平均气温为 7.4℃,平均无霜期为 166 d,积温为 3457.8℃,全年日照时数为 2797.5 h。试验田土壤为灰漠土、肥力中等。

试验采用随机区组设计,4 次重复。小区 4 行,行长 2.5 m,行距 20 cm,点播粒距 5 cm。2 年度均于 10 月初播种。按当地高产栽培技术进行管理。

1.3 产量与品质性状测定

分别在各品种(系)开花期盛期,每个小区选取 5 株具有代表性的植株,剪取其地上部分植株,测定 FW,经 105℃杀青 30 min,65℃烘干至恒重,测定 DW,鲜干比计算公式为 $FDR = FW/DW$ 。

各干样品经高速粉碎机(RT-04,台湾)粉碎、过孔径为 0.42 mm 的筛后装入自封袋保存以备测定饲草品质。饲草 CP 含量参照 GB/T 6432-2018 方法^[16]采用全自动凯氏定氮仪(BUCHI K-375,瑞士)测定,NDF 与 ADF 含量均采用范氏纤维测定法^[17]进行,相对饲用价值的计算公式为: $RFV = \frac{120}{NDF} \times (88.9 - 0.779 \times ADF)/1.29^{[18]}$ 。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理并计算各性状变异系数(coefficient of variation,CV)、标准差。采用 SPSS 19.0 进行相关性分析与主成分分析。采用 Origin Pro 2021 的最长距离法对参试种质进行聚类。利用 Shannon—Wiener 指数 H' 对小黑麦饲草产量和品质性状的遗传多样性进行评价^[19],先对数量性状进行质量化处理,以各性状极差 1/10 为间距对每个性状进行分类,其中 1 级 $< X - 2S$,10 级 $\geq X + 2S$,中间每级间隔 0.5 S,X 为平均数,S 为标准差, H' 计算公式如下:

$$\text{遗传多样性指数}(H') = -\sum P_i \ln P_i$$

式中: P_i 为某一性状在第 i 个级别出现的频率。

2 结果与分析

2.1 小黑麦种质的饲草产量与品质性状

参试的 113 份冬性饲草型小黑麦的饲草产量与品质性状如表 2 所示,FW 在 2 个年度分别为 36.000~111.560 g 与 36.310~159.780 g,DW 分别为 12.000~27.000 g 与 9.150~30.150 g,FDR 分别为 2.380~4.370 与 2.610~6.210,CP 含量分别为 6.894%~13.259% 与 6.680%~14.304%,NDF 含量分别为 48.480%~74.850%

与 53.850%~67.980%, ADF 含量分别为 26.600%~42.780% 与 29.000%~39.280%, RFV 分别为 69.650~128.150 与 79.840~113.170。

表 2 小黑麦饲草产量与品质性状及方差分析

Table 2 The yield, quality traits and variance analysis of triticale forage

年度 Year	项目 Item	单株鲜草 产量 FW (g)	单株干草 产量 DW (g)	鲜干比 FDR	粗蛋白含量 CP content (%)	中性洗涤纤维 含量 NDF con- tent (%)	酸性洗涤纤维 含量 ADF con- tent (%)	相对饲用 价值 RFV
2018—2019	最大值 Maximum	111.560	27.000	4.370	13.259	74.850	42.780	128.150
	最小值 Minimum	36.000	12.000	2.380	6.894	48.480	26.600	69.650
	平均值 Mean	60.252	18.686	3.233	9.672	64.834	35.198	89.110
	变异系数 CV (%)	18.798	17.660	10.450	12.076	7.706	9.762	11.963
2019—2020	最大值 Maximum	159.780	30.150	6.210	14.304	67.980	39.280	113.170
	最小值 Minimum	36.310	9.150	2.610	6.680	53.850	29.000	79.840
	平均值 Mean	67.821	16.296	4.187	10.448	60.461	34.109	96.307
	变异系数 CV (%)	30.813	26.939	15.690	11.960	4.725	6.368	7.242
平均 Average	最大值 Maximum	113.390	23.950	4.780	12.802	68.750	39.370	112.930
	最小值 Minimum	37.210	11.340	2.730	7.684	53.920	29.000	79.240
	平均值 Mean	64.037	17.491	3.710	10.060	62.648	34.654	92.709
	变异系数 CV (%)	21.274	17.941	10.296	8.449	4.565	6.262	7.018
F 值	品种 Varieties	5.282**	2.174**	1.473**	4.298**	15.839**	8.705**	13.533**
F value	年度 Year	47.480**	32.071**	253.342**	97.436**	1015.712**	51.894**	441.373**
	品种×年度 Varieties×year	2.714**	1.108	1.175	4.307**	16.756**	6.436**	12.743**
多样性指数 H'		1.974	2.037	2.057	2.042	2.006	2.075	2.059

FW: 单株鲜草产量 Fresh forage weight per plant; DW: 单株干草产量 Dry forage weight per plant; FDR: 鲜干比 Fresh-dry ratio; CP: 粗蛋白 Crude protein; NDF: 中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber; ADF: 酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber; RFV: 相对饲用价值 Relative feed value; CV: 变异系数 Coefficient of variation. **: $P < 0.01$. 下同 The same below.

方差分析表明各性状在品种间差异达到了极显著($P < 0.01$)水平。两个年度间各性状均表现为差异极显著($P < 0.01$),其中 2018—2019 年度的 FW 平均值(60.252 g)低于 2019—2020 年度(67.821 g),而 NDF 含量平均值(64.834%)高于 2019—2020 年度(60.461%)。在品种与年份互作效应中,除 DW 和 FDR 差异不显著外,其余性状均表现为差异极显著($P < 0.01$)。

各性状 2 年平均值的变异系数为 4.565%~21.274%,平均为 10.829%,其中,FW 的变异系数最大,其次为 DW(17.941%)和 FDR(10.296%),NDF 含量的变异系数最小。参试小黑麦种质的饲草产量与品质性状的多样性指数为 1.974~2.075,7 个饲草产量与品质性状的多样性指数依次为:ADF 含量(2.075)>RFV(2.059)>FDR(2.057)>CP 含量(2.042)>DW(2.037)>NDF 含量(2.006)>FW(1.974)。

2.2 不同来源的小黑麦饲草产量与品质性状分析

供试小黑麦种质中,中国种质占 34.513%,俄罗斯种质占 16.814%,美国种质占 15.929%,瑞典种质占 7.965%,其余几个国家的种质共占 24.779%。不同国家种质间的 CP 含量差异显著($P < 0.05$)(表 3),ADF 含量差异达到极显著($P < 0.01$)水平,其中参试的中国小黑麦种质 CP 含量平均值为 10.330%,ADF 含量平均为 35.213%;俄罗斯种质的 CP 含量平均为 10.100%,ADF 含量平均为 34.792%;美国种质的 CP 含量平均为 10.063%,ADF 含量平均为 33.716%;瑞典种质的 CP 含量平均为 9.239%,ADF 含量平均为 35.964%;其余国家种质的 CP 含量平均为 9.914%,ADF 含量平均为 33.971%。参试种质国家间的 FW 变异系数均最大,平均为 20.098%;NDF 含量的变异系数均最小,平均为 4.192%。其中,国内种质的 CP 含量较高,美国种质的 NDF 与 ADF 含量较低,RFV 较高,CP 含量中等;其余国家种质的饲草产量较高。

表 3 不同来源的小黑麦饲草产量与品质性状的变异

Table 3 Variations in forage yield and quality traits of triticale germplasms from different sources

性状 Traits	中国 China		俄罗斯 Russia		美国 America		瑞典 Sweden		其余国家 Others		F 值 F value
	平均值	变异系	平均值	变异系	平均值	变异系	平均值	变异系	平均值	变异系	
	Mean	数 CV (%)	Mean	数 CV (%)	Mean	数 CV (%)	Mean	数 CV (%)	Mean	数 CV (%)	
单株鲜草产量 FW (g)	62.223	17.930	64.276	29.905	62.793	15.248	60.809	14.500	68.438	22.908	1.319
单株干草产量 DW (g)	17.653	16.872	16.873	22.383	16.424	13.922	17.243	9.688	18.526	19.327	1.897
鲜干比 FDR	3.589	10.371	3.830	10.315	3.915	9.030	3.558	10.029	3.705	9.449	1.879
粗蛋白含量 CP content (%)	10.330	7.728	10.100	8.938	10.063	7.959	9.239	9.503	9.914	7.616	3.070*
中性洗涤纤维含量 NDF content (%)	62.402	5.275	63.218	4.597	61.845	3.285	64.670	3.607	62.491	4.198	1.378
酸性洗涤纤维含量 ADF content (%)	35.213	5.283	34.792	6.586	33.716	5.855	35.964	4.132	33.971	7.211	3.514**
相对饲用价值 RFV	92.527	7.791	91.769	6.870	94.760	5.375	88.182	5.142	93.700	6.973	1.666

*: $P < 0.05$.

2.3 小黑麦饲草产量与品质性状的相关性及主成分分析

对参试的小黑麦种质饲草产量与品质性状的相关性分析表明(表 4),FW 与 DW、FDR 之间呈极显著正相关($P < 0.01$),DW 与 FDR 之间呈极显著负相关($P < 0.01$),NDF 与 ADF 含量之间呈极显著正相关($P < 0.01$),与 RFV 之间呈极显著负相关($P < 0.01$);ADF 与 RFV 之间呈极显著负相关($P < 0.01$)。DW 与 FDR、CP、NDF、RFV 间,以及 CP 含量与 NDF、ADF、RFV 之间也存在极显著($P < 0.01$)或显著($P < 0.05$)相关,尽管相关系数不高。

表 4 小黑麦种质饲草产量与品质性状间的相关性

Table 4 Correlation between forage yield and quality traits of triticale germplasm

性状 Traits	单株鲜草产量 FW	单株干草产量 DW	鲜干比 FDR	粗蛋白含量 CP content	中性洗涤纤维含量 NDF content	酸性洗涤纤维含量 ADF content
单株干草产量 DW	0.667**					
鲜干比 FDR	0.312**	-0.433**				
粗蛋白含量 CP content	0.008	-0.120**	0.190**			
中性洗涤纤维含量 NDF content	-0.019	0.103**	-0.205**	-0.254**		
酸性洗涤纤维含量 ADF content	0.048	-0.055	-0.057	-0.194**	0.716**	
相对饲用价值 RFV	-0.007	-0.084*	0.151**	0.247**	-0.959**	-0.869**

注: *与**分别表示在 0.05(双侧)与 0.01(双侧)水平上显著相关。

Note: * and ** indicates significantly correlated at the 0.05 level (two-sided) and 0.01 level (two-sided), respectively.

小黑麦种质的饲草产量与品质性状的主成分分析表明(表 5),前 3 个主成分累计贡献率为 82.198%,其中第 1 主成分的特征值为 1.894,可解释总变异的 31.573%,特征向量中除 FW 的载荷为负外,其余均为正,载荷较高的性状为 NDF 与 ADF 含量,特征向量值分别为 0.957 和 0.963,可见第一主成分为饲草纤维品质。第二主成分特征值为 1.618,可解释总变异的 26.970%,载荷较高的性状为 FW 与 DW,特征向量值分别为 0.900、0.886,可见第二主成分为饲草产量主成分。第三主成分的特征值为 1.419,可解释总变异的 23.655%,载荷较高的性状为 CP 含量与 RFV,其特征向量值分别为 0.821、0.842,因此,第三主成分为综合品质主成分。

2.4 小黑麦种质资源的聚类

依据主成分分析结果与饲草产量和品质性状间的相关性,选择了饲草产量与品质性状的关键指标即 DW、CP 含量、RFV 将 113 份小黑麦种质进行聚类分析(图 1),在欧式距离为 15 时,将参试种质聚为三类,其中第 I 类

Table 5 Principal component analysis of forage yield and quality traits of triticale forage

性状 Traits	纤维品质因子 Fiber quality factor	饲草产量因子 Forage yield factor	综合品质因子 Comprehensive quality factor
单株鲜草产量FW	-0.003	0.900	0.049
单株干草产量DW	0.157	0.886	-0.036
粗蛋白含量CP content	0.152	-0.063	0.821
中性洗涤纤维含量NDF content	0.957	0.081	0.154
酸性洗涤纤维含量ADF content	0.963	0.080	0.091
相对饲用价值RFV	0.060	0.075	0.842
特征值Eigenvalue	1.894	1.618	1.419
贡献率Contribution rate (%)	31.573	26.970	23.655
累积贡献率Cumulative contribution rate (%)	31.573	58.543	82.198

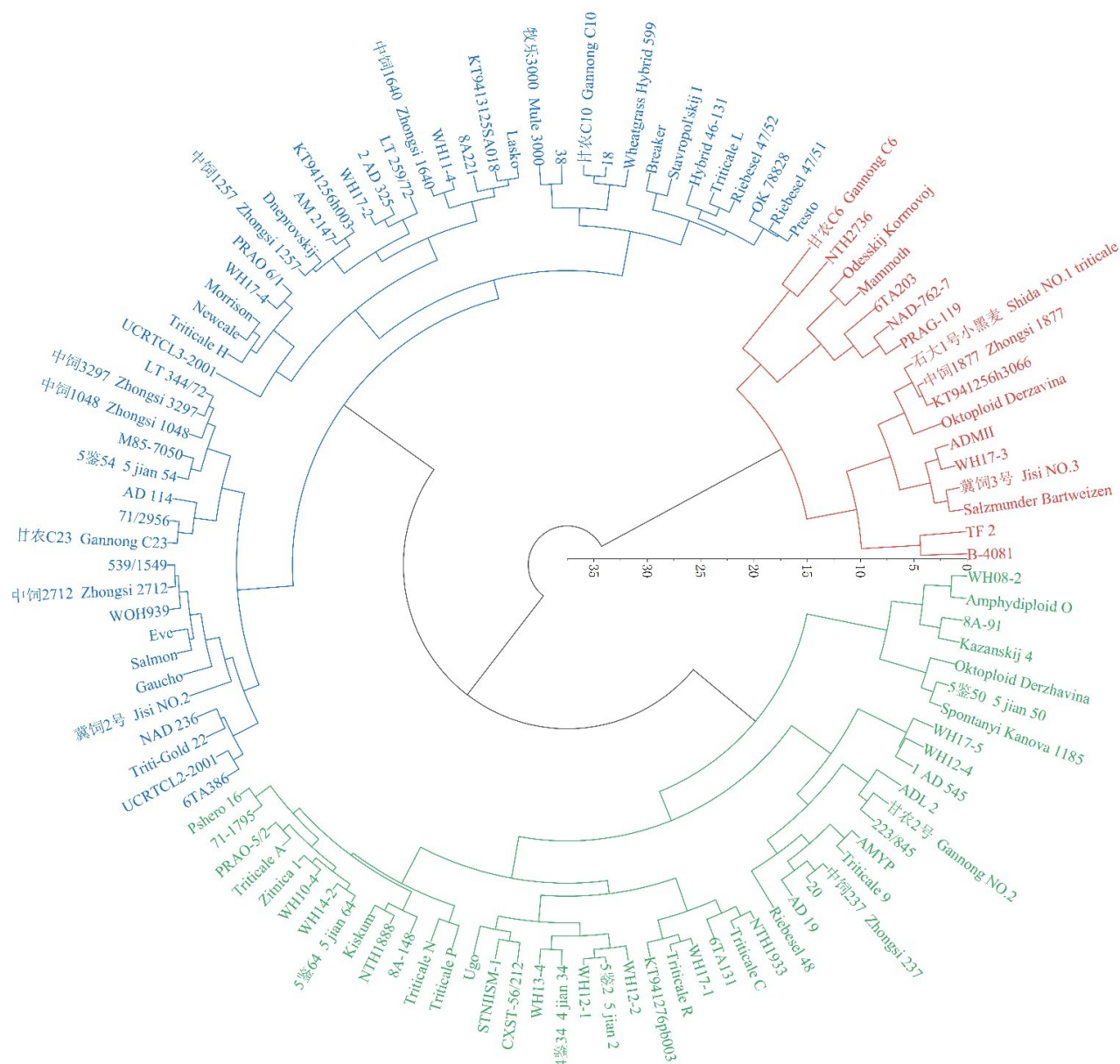


Fig. 1 Clustering results of 113 triticales

群包含 17 份种质,其主要特征为高 DW(平均为 19.297 g)、高 RFV(平均为 103.346),可以作为高产、优质种质;第Ⅱ类群含 50 份种质,主要特征为低 DW(平均为 15.726 g)、较高 RFV(平均为 94.513),属于饲草产量较差、品质较优的种质;第Ⅲ类群含有 46 份种质,主要特征为中等 DW(平均为 18.742 g)、中等 CP(平均为 9.715%)与较低 RFV(平均为 86.817),属于饲草品质较差、产量中等的类群。但第Ⅰ类(CP 平均为 10.197%)与第Ⅱ类(CP 平均为 10.331%)的 CP 含量差异不大。同时,从聚类结果看,各类群无明显的来源特点,即各类群材料存在来源交叉现象。

3 讨论

3.1 小黑麦种质饲草产量与品质的多样性

饲草产量是评价饲草生产性能的重要指标。在小黑麦生长发育进程中,其鲜草产量与干草产量随着生育期的推进逐步上升^[20],在灌浆期达到最大^[13]。尽管成熟期的单株鲜草产量高于开花期^[21],但随着刈割期的推迟,NDF 和 ADF 含量升高^[22],其饲草品质已明显不及开花期。本研究中,在开花盛期进行饲草产量与品质性状分析,该时期供试小黑麦种质的 FW 为 37.210~113.290 g,DW 为 11.340~23.950 g,同时其饲草产量在品种间存在显著差异,可见这些种质的饲草产量的多态性强。

饲草品质是评价饲草营养价值的重要指标。优质饲草须具有较高的 CP、碳水化合物等营养物质,易被家畜所喜食。NDF 含量是评价牧草适口性的重要指标之一,ADF 含量是评价牧草消化率的一个重要指标^[23]。RFV 是利用 NDF 与 ADF 来预测饲草质量的指数,其值越高,饲草料营养价值越高,牲畜的饲喂效果越好。本研究中,参试的小黑麦种质的饲草 CP 含量为 7.684%~12.802%,NDF 含量为 53.920%~68.750%,ADF 含量为 29.000%~39.370%,RFV 为 79.240~112.930。与赵方媛等^[24]研究报道的开花期小黑麦 NDF 含量为 53.88%~62.99%,ADF 含量为 34.49%~42.46% 相比,参试种质的 NDF 与 ADF 含量的多态性更丰富。

3.2 饲草产量与品质性状的年份间差异

小黑麦的饲草产量在年份间存在显著差异,其中,2019—2020 年度饲草产量与鲜干比表现最突出,其 FW 与 FDR 的最大、最小值及平均值均高于 2018—2019 年度,DW 的最大值与平均值均高于 2018—2019 年度。小黑麦饲草品质性状在年份间存在显著差异,2018—2019 年度的 NDF 与 ADF 含量平均值高于 2019—2020 年度,2019—2020 年度的 RFV 平均值高于 2018—2019 年度。这与魏常敏等^[25]、郭艳红等^[26]、赵方媛等^[27]的研究结果小黑麦的鲜草产量、CP、ADF 和 NDF 含量在年份间均存在极显著差异相一致,也与 Lekgari 等^[7]对小黑麦饲草产量、NDF 和 ADF 在位置效应及年份×位置交互效应中均差异显著的研究结果相一致。可见生态因子对小黑麦饲草产量与品质性状的影响也较大,这可能是因为环境条件、栽培方式甚至取样的具体生育时期有差异。本试验的饲草产量与品质受取样时期与环境的影响较大,若想取得更为理想的分析结果,应严格控制试验环境条件以及取样时期。

3.3 不同来源小黑麦种质的饲草产量与品质性状差异

由于育种目标、环境影响和地域适应等因素影响会造成不同来源种质的性状间存在较大差异,即不同地理来源的种质其饲草产量与品质具有特异性。本研究对 15 个国家的小黑麦种质的饲草产量与品质性状比较发现,参试的美国小黑麦种质的 NDF 与 ADF 含量较低而 RFV 较高,其品质较为优良;其他国家种质的饲草产量较高,其 FW 平均为 68.438 g,DW 平均为 18.526 g。这可能与小黑麦饲草可作为青贮、放牧或干草等牲畜饲料的利用方式不同有关,有些国家与地区小黑麦主要以籽粒作为精饲料利用^[22,28-30]。

3.4 饲草产量与品质性状的相关性

性状间的相关性反映了不同性状间相互独立又错综复杂的关系。本研究表明,小黑麦饲草的 ADF 含量与 DW 间存在弱负相关性,DW 与 NDF 含量呈极显著正相关关系,但与 CP 含量及 FDR 间呈极显著负相关关系;而 CP 含量与 NDF 及 ADF 含量间呈极显著负相关关系,与 FDR 呈极显著正相关;NDF 含量与 FDR 呈极显著负相关。这与王彦华等^[31]在紫花苜蓿(*Medicago sativa*)中的研究结果一致。主成分分析表明,前 3 个主成分依特征值从大到小依次为饲草纤维品质因子、饲草产量因子与综合品质因子,这与谭秀英等^[32]、张阳等^[33]、杨彦忠等^[34]在燕

麦、一年生牧草、小黑麦中的结论相一致,即 RFV、CP 含量以及干物质产量是造成饲草产量与品质性状差异的主要因素。

3.5 小黑麦种质资源的分类与利用

依据主成分分析结果与饲草产量、品质性状间的相关性,选择 DW、CP、RFV,将参试的 113 份小黑麦种质聚为 3 类,其中以中饲 237、甘农 C6、Odesskij Kormovoj 等为代表的 17 份种质具有较高的饲草产量、高的相对饲用价值,可以作为小黑麦饲草产量与品质改良的优质亲本。但各类群种质之间无明显的地理来源差异,即具有共同的地理来源的材料并未完全聚为一类,这与前人对小黑麦、陆地棉(*Gossypium hirsutum*)及羊草(*Leymus chinensis*)的研究结论一致^[15,35-36],这可能是由广大育种家之间进行了频繁的种质交换造成的,也同现代小黑麦品种主要是通过品种间杂交选育而来的实际情况相吻合^[1]。

4 结论

供试小黑麦种质资源来源广泛,遗传变异丰富,遗传多样性指数(H')变幅为 1.974~2.075。小黑麦的 DW、CP 含量与 RFV 是评价小黑麦饲草产量与品质性状的关键指标。根据这些小黑麦饲草产量与品质的关键指标对参试种质进行聚类,中饲 237、甘农 C6、Odesskij Kormovoj 等 17 份材料可以作为饲草型小黑麦改良的优质亲本来利用。本研究为饲草型小黑麦遗传改良奠定了基础。

参考文献 References:

- [1] Sun Y S. Research and application of genetics and breeding of triticale in China. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2002.
孙元枢. 中国小黑麦遗传育种研究与应用. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2002.
- [2] Zillinsky F J. The development of triticale. *Advances in Agronomy*, 1974, 26: 315—348.
- [3] Dyda M, Tyrka M, Gołbiowska G, *et al.* Genetic mapping of adult-plant resistance genes to powdery mildew in triticale. *Journal of Applied Genetics*, 2021, 63(1): 73—86.
- [4] Blum A. The abiotic stress response and adaptation of triticale—A review. *Cereal Research Communications*, 2014, 42(3): 359—375.
- [5] Müller M C, Kunz L, Graf J, *et al.* Host adaptation through hybridization: Genome analysis of triticale powdery mildew reveals unique combination of lineage-specific effectors. *Molecular Plant-microbe Interactions*, 2021, 34(12): 1350—1357.
- [6] Chen R Y, Cheng J, Zheng C X, *et al.* Analysis on adaptability of forage triticale. *Seed*, 2010, 29(6): 81—83.
陈柔屹, 程江, 郑常祥, 等. 饲用小黑麦适应性分析. *种子*, 2010, 29(6): 81—83.
- [7] Lekgari L A, Baenziger P S, Vogel K P, *et al.* Identifying winter forage triticale ($\times$ *Triticosecale* Wittmack) strains for the central great plains. *Crop Science*, 2008, 48(5): 2040—2048.
- [8] Estrada-campuzano G, Slafer G A, Miralles D J. Differences in yield, biomass and their components between triticale and wheat grown under contrasting water and nitrogen environments. *Field Crops Research*, 2012, 128: 167—179.
- [9] Mergoum M, Gómez-macpherson H. Triticale improvement and production. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2004.
- [10] Song H X, Xu Y X, Wang C W. Research on suitable cutting and drying period for forage triticale hay production. *Crops*, 2003(6): 29—31.
宋慧欣, 许永新, 王崇旺. 饲草小黑麦干草生产适宜割、晒期研究. *作物杂志*, 2003(6): 29—31.
- [11] Dai H L, Tian X H, Du W H, *et al.* Study on grass yield and nutrient quality of forage type triticale in Gannan area. *Grassland and Turf*, 2019, 39(2): 66—72.
代寒凌, 田新会, 杜文华, 等. 甘南地区饲用型小黑麦草产量及营养品质研究. *草原与草坪*, 2019, 39(2): 66—72.
- [12] Liu J, Song Q, Tian X H, *et al.* Evaluation of the adaptability of triticale genotypes using membership function and GGE-Biplot analysis. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(5): 85—96.
刘晶, 宋谦, 田新会, 等. 基于隶属函数法和 GGE 双标图的饲草型小黑麦种质适应性评价. *草业学报*, 2018, 27(5): 85—96.
- [13] He P L, Wang Y M, Jie H D, *et al.* Effects of different cutting time on the forage yield and nutritional quality of forage triticale.

- Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(11): 2609—2614.
- 何鹏亮, 汪娅梅, 揭红东, 等. 不同刈割期对饲用小黑麦草产量和营养品质的影响. 草地学报, 2021, 29(11): 2609—2614.
- [14] Wang R Q, Wang Y W, Xu X Y, *et al.* Correlation and cluster analysis of agronomic traits of triticale germplasm. Xinjiang Agricultural Sciences, 2015, 52(9): 1591—1599.
- 王瑞清, 王有武, 徐晓燕, 等. 小黑麦种质资源农艺性状的相关及聚类分析. 新疆农业科学, 2015, 52(9): 1591—1599.
- [15] Kuleung C, Baenziger P S, Kachman S D, *et al.* Evaluating the genetic diversity of triticale with wheat and rye SSR markers. Crop Science, 2006, 46(4): 1692—1700.
- [16] Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences (National Feed Quality Supervision and Inspection Center). Determination of crude protein in feed—Kjeldahl method, GB/T 6432-2018. Beijing: China Standards Press, 2018.
- 中国农业科学院农业质量标准与检测技术研究所(国家饲料质量监督检验中心). 饲料中粗蛋白的测定—凯氏定氮法, GB/T 6432-2018. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [17] Yang S. Feed analysis and feed quality testing technology. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1993.
- 杨胜. 饲料分析及饲料质量检测技术. 北京: 北京农业大学出版社, 1993.
- [18] Hu H L, Lu Y. Forage grading index technology—New progress in forage quality assessment. Animal Husbandry and Feed Science, 2011, 32(Z1): 155—158.
- 胡红莲, 卢媛. 粗饲料分级指数技术—粗饲料品质评定的新进展. 畜牧与饲料科学, 2011, 32(Z1): 155—158.
- [19] Liang G L, Liu W H, Ma X. Phenotypic diversity of the panicle among 590 covered oats germplasm resources in apline of Qinghai—Tibet plateau. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(3): 495—503.
- 梁国玲, 刘文辉, 马祥. 590 份皮燕麦种质资源穗部性状遗传多样性分析. 草地学报, 2021, 29(3): 495—503.
- [20] Zhu X K, Sun J Y, Guo W S, *et al.* Characteristics of forage yield and quality of different triticale varieties. Barley and Cereal Sciences, 2010(3): 1—7.
- 朱新开, 孙建勇, 郭文善, 等. 不同类型小黑麦饲草产量和品质特性研究. 大麦与谷类科学, 2010(3): 1—7.
- [21] Jin X N. Genetic analysis and QTL mapping on the forage yield related traits in forage triticale based on the RIL population. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.
- 金星娜. 饲用型小黑麦 RIL 群体草产量相关性状的遗传分析及 QTL 定位. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- [22] Cao L P, Kong G C. Research and application of physiological ecology and genetic breeding of triticale. Beijing: Economics and Management Press, 2011.
- 曹连莆, 孔广超. 小黑麦生理生态及遗传育种研究与应用. 北京: 经济管理出版社, 2011.
- [23] Filho A E, Carvalho G G P, Pires A J V, *et al.* Intake and ingestive behavior in lambs fed low-digestibility forages. Tropical Animal Health and Production, 2016, 48(7): 1315—1321.
- [24] Zhao F Y, Zhao Y J, Tian X H, *et al.* Comprehensive evaluation of forage yield and nutritional value of 30 triticale cultivars in semi-arid irrigation area of Lintao, Gansu Province. Grassland and Turf, 2021, 41(4): 10—16.
- 赵方媛, 赵雅姣, 田新会, 等. 30 个小黑麦品种在甘肃临洮县半干旱灌区的草产量及营养价值综合评价. 草原与草坪, 2021, 41(4): 10—16.
- [25] Wei C M, Xu W M, Xing Y F, *et al.* Genotype×environment interaction effect of waxy maize varieties in Huang—Huai—Hai Region. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(4): 888—896.
- 魏常敏, 许卫猛, 邢永锋, 等. 黄淮海糯玉米品种基因型与环境互作效应分析. 南方农业学报, 2021, 52(4): 888—896.
- [26] Guo Y H, Pu X J, Pu X P, *et al.* Change tendency of the aboveground biomass and nutrition quality in the Alpine Pastoral Area of Qinghai Tibet. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(4): 734—742.
- 郭艳红, 蒲小剑, 蒲小鹏, 等. 青藏高寒牧区天然草地上生物量和营养品质的变化规律. 草地学报, 2021, 29(4): 734—742.
- [27] Zhao F Y, Du W H, Qu G P, *et al.* Studies on the production performance and nutritional value of new rye line C32 in pastoral areas of Tibet. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(1): 279—284.
- 赵方媛, 杜文华, 曲广鹏, 等. 黑麦新品系 C32 在西藏牧区的生产性能和营养价值研究. 草地学报, 2020, 28(1): 279—284.
- [28] Mazen A, Lori O, Susan A, *et al.* Variability, heritability and genetic advance in some agronomic and forage quality characters of spring triticale in western Canada. Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences, 2014, 79(4): 9—18.
- [29] Vega-garcía J I, López-gonzález F, Morales-almaz E, *et al.* Grazed rain-fed small-grain cereals as a forage option for small-

- scale dairy systems in central Mexico. *Research Square*, 2021, 53(5): 511.
- [30] Ayalew H, Kumssa T T, Butler T J, *et al.* Triticale improvement for forage and cover crop uses in the southern great plains of the United States. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 01130.
- [31] Wang Y H, Yu C L, Gao Y G, *et al.* Study on nutritional quality and correlation of different alfalfa varieties. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(2): 11–15.
王彦华, 余春林, 高永革, 等. 不同紫花苜蓿品种营养品质及相关性研究. *中国农学通报*, 2010, 26(2): 11–15.
- [32] Tan X Y, Yan J, Fan Y, *et al.* Dynamic analysis and genotypic screening of nutrient content of forage oats at different growth stages. *Seed*, 2019, 38(11): 20–28.
谭秀英, 严俊, 范昱, 等. 不同生育时期饲用燕麦养分含量的动态分析及基因型筛选. *种子*, 2019, 38(11): 20–28.
- [33] Zhang Y, Zhang W, Zhao W J, *et al.* Variety screening and study of cultivation technology for forage triticale varieties based on principal component and grey relation analysis. *Crops*, 2020(3): 117–124.
张阳, 张伟, 赵威军, 等. 基于主成分与灰色关联分析的饲草小黑麦品种筛选与配套技术研究. *作物杂志*, 2020(3): 117–124.
- [34] Yang Y Z, Zhou W Q, Lian X R, *et al.* Comprehensive evaluation of production characteristics of annual forage crops based on principal component analysis: A case study of Zhuanglang in Gansu. *Pratacultural Science*, 2018, 35(6): 1503–1509.
杨彦忠, 周文期, 连晓荣, 等. 基于主成分分析综合评价一年生饲草的生产性能—以甘肃庄浪为例. *草业科学*, 2018, 35(6): 1503–1509.
- [35] Dai P H. Genetic diversity and association analysis of agronomic traits for upland cotton core germplasm based on SSR markers. Jingzhou: Yangtze University, 2016.
代攀虹. 陆地棉核心种质遗传多样性及其农艺性状与SSR关联分析. 荆州: 长江大学, 2016.
- [36] Li X S. Effects of germplasm resources of *Leymus chinensis* from different geographical sources on soil properties in common garden. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
李贤松. 不同地理来源羊草种质资源对同质园土壤性状的影响研究. 北京: 中国农业科学院, 2021.