

陇东旱塬区秋播小黑麦与黑麦 立体种植模式探究

齐文嘉¹, 宋谦², 田新会¹, 杜文华¹

(1. 甘肃农业大学草业学院/草业生态系统教育部重点实验室/甘肃省草业工程实验室/中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 甘肃兰州 730070; 2. 甘肃省平凉市农业科学院, 甘肃平凉 744000)

摘要: 研究5个饲用小黑麦(*Triticosecale* Wittmack)品种(‘甘农2号’, ‘甘农3号’, ‘甘农4号’, ‘甘农7号’, ‘藏饲1号’)分别与‘甘农1号’黑麦(*Secale cereale* ‘Gannong No.1’)以不同混播比例(100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 0:100)进行立体种植的生产性能和营养价值研究, 为陇东旱塬区秋播小黑麦和黑麦立体种植提供理论依据。结果表明, 陇东旱塬区B1(‘甘农2号’小黑麦与‘甘农1号’黑麦混播)和B2组合(‘甘农3号’与‘甘农1号’黑麦混播)以不同比例混播的平均干草产量显著高于B5(‘藏饲1号’小黑麦与‘甘农1号’黑麦)组合, 分别提高21.68%和18.80%; 不同小黑麦品种与‘甘农1号’黑麦以A6(50:50)的比例混播时, 平均干草产量显著高于小黑麦单播, 且高于黑麦单播, 增幅分别为22.94%和3.05%; 基于干草产量、营养价值和倒伏率的综合评价表明, ‘甘农3号’小黑麦与‘甘农1号’黑麦以70:30的比例混播进行立体种植时效果最好, 适宜在陇东旱塬区及其他气候相似区推广种植。

关键词: 小黑麦; 黑麦; 混播; 立体种植; 综合评价; 陇东旱塬区

中图分类号: S512.4; S512.5 **文献标志码:** A

Stereoscopic cultivation mode of autumn sown triticale and rye in Longdong rainfed plateau area

QI Wenjia¹, SONG Qian², TIAN Xinhui¹, DU Wenhua¹

(1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U.S. Centers for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Pingliang Academy of Agricultural Sciences, Pingliang, Gansu 744000, China)

Abstract: The production performance and nutritive values of 5 autumn sown triticale (*Triticosecale* Wittmack) varieties (‘Gannong No.2’, ‘Gannong No.3’, ‘Gannong No.4’, ‘Gannong No.7’, ‘Zangsi No.1’) mixed with rye (*Secale cereale* L.) variety ‘Gannong No.1’ at different mix-sowing rates (100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 0:100) were studied to lay a theoretical foundation for the stereoscopic cultivation mode of autumn sown triticale with rye in the Longdong rainfed plateau area. The results showed that the average hay yield of B1 (‘Gannong No.2’ triticale mixed with ‘Gannong No.1’ rye) and B2 combination (‘Gannong No.3’ triticale mixed with ‘Gannong No.1’ rye) in different proportions in the Longdong rainfed plateau area was significantly higher than that of B5 combination (‘Zangsi No.1’ triticale mixed with ‘Gannong No.1’ rye), which was 21.68% and 18.80% higher, respectively. When different triticale varieties were mixed with ‘Gannong No.1’ rye at a 50:50 sowing rate, the average hay yield was significantly higher than that of triticale single sowing, and higher than that of rye single sowing, with an increase of 22.94% and 3.05%, respectively. Through comprehensive

收稿日期:2023-06-23

修回日期:2023-10-13

基金项目: 甘肃省科技重大专项(21ZD4NA012); 甘肃省高等学校产业支撑计划项目(2022CYZC-49); 国家自然科学基金(32260339); 甘肃省重点研发项目(20YF8NA129)

作者简介: 齐文嘉(1998-), 男, 内蒙古通辽人, 硕士研究生, 研究方向为牧草栽培与育种。E-mail: 956502205@qq.com

通信作者: 杜文华(1968-), 女, 甘肃临洮人, 教授, 博士生导师, 主要从事草种质资源及育种栽培研究。E-mail: duwh@gsau.edu.cn

evaluation based on hay yield, nutritional value, and lodging rate showed that ‘Gannong No.3’ triticale mixed with ‘Gannong No.1’ rye at a 70 : 30 sowing rate had the best effect when used for stereoscopic cultivation. It is recommended for popularization and planting in the Longdong rainfed plateau area and other areas with similar climates.

Keywords: triticale; rye; mix-sowing; stereoscopic cultivation; comprehensive evaluation; Longdong rainfed plateau area

陇东旱塬区地处黄土高原沟壑区,属于半干旱半湿润大陆性气候^[1]。该区光热条件充足,土地广袤,具有发展草食畜牧业的天然优势。近年来,陇东旱塬区以牛羊为主的草食畜牧业发展迅速,随着牛羊规模不断壮大,长期以农作物秸秆为主的饲草结构严重制约该区草食畜牧业的高质量发展^[2]。因此,引进并筛选适宜该区种植的优质高产饲草品种,同时探究饲草高效种植模式,对于推动当地饲草产业和草食畜牧业高质量发展具有重要意义^[3]。小黑麦(*Triticosecale* Wittmack)是小麦属(*Triticum*)和黑麦属(*Secale*)植物通过远缘杂交人工育成的第一个异源多倍体新物种^[4-6]。小黑麦结合了小麦和黑麦的优势,具有草产量高、营养价值好、抗逆性强、适应性广等优良特性^[7-9]。李冬梅等^[10]研究显示,‘甘农 3 号’小黑麦在甘肃省临洮县的干草产量和粗蛋白含量分别为 16.20 t · hm⁻²和 14.91%;赵雅姣等^[11]研究表明,‘甘农 2 号’小黑麦孕穗期青干草的粗蛋白含量为 18.24%;郭建文等^[12]研究表明,小黑麦是甘肃省高海拔地区生产饲料的优良牧草,其鲜、干草产量分别达到 20.97 t · hm⁻²和 8.08 t · hm⁻²;李焰焰等^[13]在皖西北研究发现,小黑麦的鲜草产量超过 50 t · hm⁻²;时丽冉等^[14]研究表明,小黑麦在盐碱地表现出稳产优势。黑麦(*Secale cereale* L.)为黑麦属一年生或越年生饲用作物^[15],具有耐寒、耐旱和耐贫瘠等优良特性,能够在较为恶劣的条件下获得较高产量。曹凤娇等^[16]研究表明,黑麦幼苗能够忍受-40℃低温,且其对土壤要求不高,可以在瘠薄地种植^[17];章瑞华等^[18]研究发现,黑麦的庞大须根系腐烂后可增加土壤腐殖质,提高土壤肥力,促进下茬作物生长;武慧娟等^[19]在兰州市永登县的研究表明,黑麦可以收获两茬,全年干草产量为 4.63 t · hm⁻²;李国辉等^[20]研究表明,黑麦在利用冬闲田资源方面具有广阔发展前景。

从植物学特征看,小黑麦生长发育较缓慢,刈割期株高较低,一般为 1.6~1.7 m,茎秆较为粗壮,抗倒伏;而黑麦生长发育迅速,刈割期株高可达 2 m 以上,茎秆纤细易倒伏^[21]。小黑麦较强的抗倒伏能力保证了其正常生长和生理功能,且茎秆中高比例的基本组织结构有利于储存更多营养物质^[22]。小

黑麦和黑麦进行混播和立体种植,可以充分利用空间和光照,在保证混播群体不倒伏的前提下,提高单位面积草产量并优化饲草营养品质。目前国内对小黑麦和黑麦的研究主要集中在遗传机制^[23-24]、品种选育^[25-26]和抗性生理^[27-28]等方面,关于秋播小黑麦和黑麦通过混播进行立体种植的相关研究报道尚不多见。为丰富陇东旱塬区的饲草高效种植模式,本试验探究了 5 个饲用小黑麦品种(‘甘农 2 号’,‘甘农 3 号’,‘甘农 4 号’,‘甘农 7 号’,‘藏饲 1 号’)分别与‘甘农 1 号’黑麦以不同混播比例进行立体种植的生产性能和营养价值,以期为陇东旱塬区秋播小黑麦和黑麦立体种植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2021—2022 年在甘肃省平凉市农业科学院高平试验站(35°17'N,107°30'E)进行,该区地处甘肃东部的陕甘交界处,海拔 1 320 m。年均气温 10.9℃,年均降水量 587.7 mm,无霜期 170 d。试验地土壤为黑垆土,土壤有机质 6.65 g · kg⁻¹,速效氮 104.00 mg · kg⁻¹,速效磷 20.00 mg · kg⁻¹,速效钾 91.47 mg · kg⁻¹;前茬作物为青贮玉米,无灌溉条件。

1.2 试验材料

供试小黑麦品种为‘甘农 2 号’、‘甘农 3 号’、‘甘农 4 号’、‘甘农 7 号’和‘藏饲 1 号’,黑麦品种为‘甘农 1 号’,均为甘肃农业大学草业学院培育。

1.3 试验设计

试验采用裂区设计,主区为小黑麦和黑麦的混播比例,设 7 个水平,分别为 A1(100 : 0)、A2(90 : 10)、A3(80 : 20)、A4(70 : 30)、A5(60 : 40)、A6(50 : 50)、A7(0 : 100);副区为小黑麦不同品种与‘甘农 1 号’黑麦的混播组合,设 5 个水平,分别为 B1(‘甘农 2 号’小黑麦和‘甘农 1 号’黑麦混播);B2(‘甘农 3 号’小黑麦和‘甘农 1 号’黑麦混播);B3(‘甘农 4 号’小黑麦和‘甘农 1 号’黑麦混播);B4(‘甘农 7 号’小黑麦和‘甘农 1 号’黑麦混播);B5(‘藏饲 1 号’小黑麦和‘甘农 1 号’黑麦混播)。

共 35 个处理,3 次重复,总计 105 个小区,小区面积为 $15 \text{ m}^2(3 \text{ m} \times 5 \text{ m})$ 。

播种日期为 2021 年 10 月 22 日,条播,播种深度 $3 \sim 4 \text{ cm}$,小黑麦品种单播的播种密度均为 600 万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$,黑麦单播的播种密度为 500 万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$,

等比例混播时小黑麦和黑麦的播种量为各自单播量的 70%^[29]。各混播处理小黑麦和黑麦的播种量见表 1。播前施磷酸二铵 $375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,次年返青后,追施尿素 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。收获日期为 2022 年 6 月 2 日。

表 1 不同混播组合和比例下小黑麦与黑麦的播种量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$

Table 1 Seeding rate of triticale and ryes of different mixture combination and mixed ratio

编号 Code	B1		B2		B3		B4		B5	
	甘农 2 号 Gannong No.2	甘农 1 号 Gannong No.1	甘农 3 号 Gannong No.3	甘农 1 号 Gannong No.1	甘农 4 号 Gannong No.4	甘农 1 号 Gannong No.1	甘农 7 号 Gannong No.7	甘农 1 号 Gannong No.1	藏饲 1 号 Zangsi No.1	甘农 1 号 Gannong No.1
A1	312.60	0.00	217.20	0.00	289.20	0.00	211.80	0.00	225.60	0.00
A2	393.88	16.81	273.67	16.81	364.39	16.81	266.87	16.81	284.26	16.81
A3	350.11	33.61	243.26	33.61	323.90	33.61	237.22	33.61	252.67	33.61
A4	306.35	50.42	212.86	50.42	283.42	50.42	207.56	50.42	221.09	50.42
A5	262.58	67.23	182.45	67.23	242.93	67.23	177.91	67.23	189.50	67.23
A6	218.82	84.04	152.04	84.04	202.44	84.04	148.26	84.04	157.92	84.04
A7	0.00	120.10	0.00	120.10	0.00	120.10	0.00	120.10	0.00	120.10

1.4 测定指标及方法

株高:开花期刈割前进行测定,各小区每种牧草分别随机选择 20 株,自地面测量其自然高度,取平均值即为株高。

枝条数:开花期刈割前进行,各小区于边行外随机选取 1 m 样段,分别测定该样段中株高高于 20 cm 的不同牧草的枝条数量。

茎粗:开花期刈割前进行。各小区每种牧草分别随机选择 10 株,用游标卡尺测量基部第 2 节间中部茎秆的直径即为茎粗。

倒伏率:开花期刈割前进行,测量并计算每个小区植株倾斜度大于 45° 的面积占小区总面积的百分数,即该小区的倒伏率。

干草产量:收获时齐地面刈割小区内的所有植株,称重得到鲜草产量,从中取样 500 g 烘干至恒重,计算 500 g 鲜样的鲜干比,折算单位面积干草产量。

营养成分:各处理将烘干草样粉碎,过 1 mm 筛,分别混合均匀后随机取 3 份样品,作为 3 个重复测定各项指标。粗蛋白含量(CP)采用凯氏定氮法测定;中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维含量(ADF)采用范氏洗涤纤维分析法测定。

1.5 数据分析

利用 SPSS 25.0 软件进行数据统计分析,使用 Origin 2021 和 Excel 2010 软件进行作图,用 Duncan 法对存在显著差异的指标进行多重比较,利用 TOPSIS(Technique for order preference by similarity to an ideal solution,逼近于理想值的排序方法)模型综合评价分析不同混播组合和混播比例对混播草地

草产量及营养价值产生的影响,最后选择最贴近理想解的牧草种植模式作为最优决策。

1.6 综合评价

混播群体的产草量和牧草营养成分含量是评价牧草饲用价值的重要指标,一般认为草产量高、粗蛋白含量高、粗纤维含量低的牧草饲用价值较高,本试验中还需考虑倒伏率对混播群体的影响。然而,各个指标在品种评估中的重要程度不相同^[30],因此需要给各性状赋予不同权重。根据项目组前期研究结果^[31],将干草产量、粗蛋白含量和倒伏率的权重分别设为 0.60、0.20 和 0.05,其余指标平分剩余权重,各指标权重之和为 1。由于各性状的量纲不同,故使用 SPSSAU 对 NDF、ADF 和倒伏率先进行逆向化(NMMS)处理,再对所有数据进行平方和均一化(SSN),之后进行 TOPSIS 综合评价,数据标准化公式如下:

$$X_{\text{NMMS}} = \frac{I_{\text{max}} - X}{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}$$

$$X_{\text{SSN}} = \frac{X}{\sqrt{\text{Sum}(X^2)}}$$

式中, X_{NMMS} 和 X_{SSN} 分别为进行逆向化和标准化后的数值, I_{max} 和 I_{min} 分别为各指标中的最大值和最小值。

2 结果与分析

2.1 不同指标方差分析结果

方差分析(表 2)表明,混播比例间除小黑麦株高和干草产量外,其他指标均存在显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)差异;混播组合间小黑麦株高、干草产量和 NDF 存在显著($P < 0.05$)或极显著($P <$

0.01) 差异;混播比例和混播组合交互作用间,黑麦的枝条数和茎粗、干草产量、CP 和 NDF 存在极显著 ($P<0.01$) 或显著 ($P<0.05$) 差异。需对前述存在显著和极显著差异的指标进行多重比较。

2.2 不同混播比例处理间生产性能和营养成分的差异

混播比例为 A1 (小黑麦单播) 和 A2 时,5 个混播组合的小黑麦平均株高显著 ($P<0.05$) 高于 A5,

增幅分别为 7.03% 和 6.02%,其他混播比例间小黑麦的平均株高无显著差异 ($P>0.05$)。对于‘甘农 1 号’黑麦而言,除 A7 处理 (黑麦单播) 的平均株高显著 ($P<0.05$) 低于其余处理外,其他混播处理间均无显著差异 (图 1a)。

混播比例为 A3 时,5 个混播组合的小黑麦平均枝条数最多,且显著 ($P<0.05$) 高于除 A1 (小黑麦单播) 外的其他处理,增幅为 17.60%~84.44%;其次为

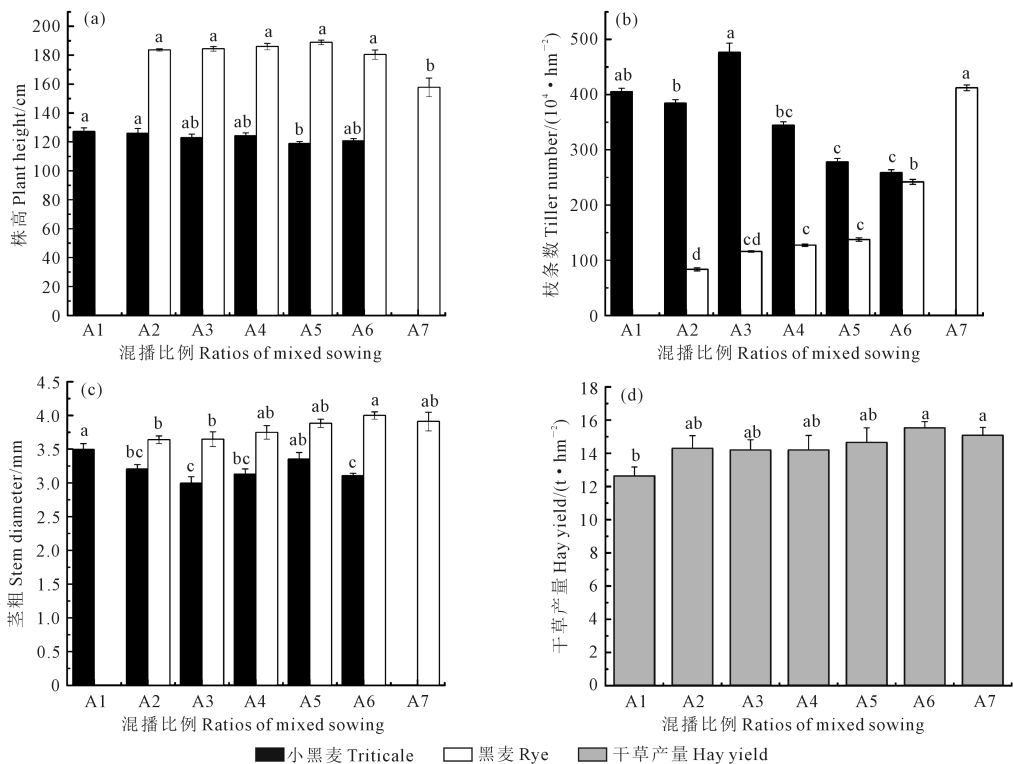
表 2 各指标的方差分析

Table 2 Variance analysis for each parameter

因素水平 Factor level	变异来源 Variation source	F 值 F value										
		株高 Plant height		枝条数 Tiller number		茎粗 Stem diameter		干草产量 Hay yield	倒伏率 Lodging rate	CP	NDF	ADF
		小黑麦 Triticale	黑麦 Rye	小黑麦 Triticale	黑麦 Rye	小黑麦 Triticale	黑麦 Rye					
单因素 Single factor	混播比例 Mixed sowing ratio	1.971	12.395 **	7.483 **	112.211 **	5.139 **	2.577 *	1.774	272.273 **	2.802 *	7.808 **	2.877 *
	混播组合 Mixture combination	5.090 **	0.222	0.670	0.620	0.434	0.659	3.821 **	0.958	1.932	2.613 *	0.451
二因素 Interaction of two factors	混播比例×混播组合 Mixed sowing ratios× Mixture combination	1.477	1.156	1.384	4.452 **	1.397	2.033 *	2.593 **	0.990	2.397 **	2.756 **	0.751

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

Note: * and ** indicating significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively. The same below.



注: 不同小写字母表示相同作物或相同指标下不同混播比例间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between mixed sowing ratios under the same crop or the same index ($P<0.05$). The same below.

图 1 不同混播比例处理间生产性能的差异

Fig.1 Production performance differences among treatments with different mixed sowing ratios

A1,其平均枝条数显著($P<0.05$)高于A5和A6处理。随着黑麦混播比例的增加,黑麦的平均枝条数呈升高趋势,A7处理(黑麦单播)为最大值(图1b)。

5个小黑麦品种单播(A1)时,其平均茎粗最粗,显著($P<0.05$)高于除A5外的其他处理,增幅为8.72%~16.33%;混播处理中A5最高,较A3和A6分别显著($P<0.05$)提高11.67%和7.72%。黑麦的平均茎粗随混播比例升高而增粗,A6时最高,显著($P<0.05$)高于A2和A3(图1c)。

从混播群体的干草产量看,A6处理的平均干草产量最高,其次为A7;A1的干草产量显著($P<0.05$)低于A6、A7处理,分别降低22.94%和19.30%(图1d)。

如图2所示,黑麦单播(A7)的平均倒伏率最高(73.00%),混播草地的平均倒伏率随着黑麦混播比例的增加而增高;混播处理中,A5和A6平均倒伏率最高,分别为18.00%和21.00%。

如图3所示,CP和NDF以小黑麦单播处理(A1)为最高,A1的CP较黑麦单播(A7)和A5均显著($P<0.05$)提高18.14%,A1的NDF显著高于其余

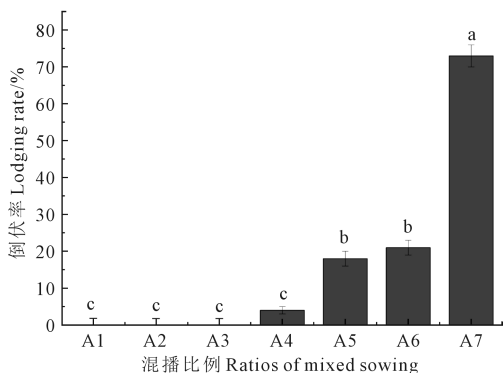


图2 不同混播比例处理间倒伏率的差异

Fig.2 Lodging rate differences among treatments with mixed sowing ratios

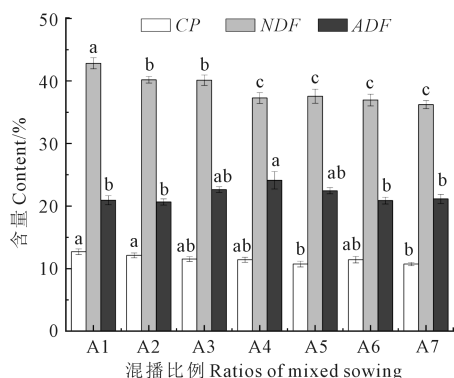


图3 不同混播比例处理间营养价值的差异

Fig.3 Nutritional value differences among treatments with mixed sowing ratios

处理,增幅为6.54%~18.28%;混播处理中,随着黑麦比例增加,CP和NDF不同程度下降,A4处理的ADF最高,显著($P<0.05$)高于除A3、A5以外的其他处理。

2.3 不同混播组合间生产性能和营养成分的差异

如表3所示,混播组合间,B5的小黑麦平均株高最高,显著($P<0.05$)高于除B4外的其他组合,增幅为4.78%~10.39%;B2、B4组合的小黑麦平均株高显著($P<0.05$)高于B3。从产草量上看,B1和B2组合的平均干草产量显著($P<0.05$)高于B5,增幅分别为21.68%和18.80%。B5处理下混播群体的平均NDF最低且显著($P<0.05$)低于B1和B3。

2.4 混播组合和混播比例交互处理间生产性能和营养价值的差异

如图4所示,同一混播比例下,混播组合之间的黑麦枝条数有不同程度差异。A2比例下,B5组合的黑麦枝条数显著($P<0.05$)高于B1;A6比例下,B4组合黑麦枝条数最高且显著($P<0.05$)高于其余处理,B3显著高于B1和B2;A7比例下,B4组合黑麦枝条数最高且显著($P<0.05$)高于其余处理,B5显著($P<0.05$)高于B1和B3。综上,B4和B5组合黑麦的枝条数较多。

同一混播比例下,不同混播组合之间的黑麦茎粗表现出不同程度差异(图5)。A3比例下,B2组合黑麦的茎粗最高,显著($P<0.05$)高于B4和B5;A4比例下,B3组合黑麦茎粗最高,显著($P<0.05$)高于B1;A7比例下,B5组合的黑麦茎粗显著($P<0.05$)高于B2。

同一混播比例下,不同混播组合之间的干草产量有不同程度差异(图6)。A2比例下,B2组合的干草产量显著($P<0.05$)高于其余处理,增幅为32.52%~76.98%;A3比例下,B3组合的干草产量最高,但与

表3 不同混播组合间生产性能和营养成分的差异

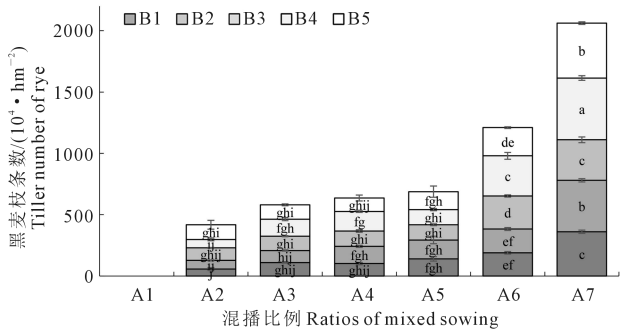
Table 3 Differences of the production performance among the mixture combinations

混播组合 Mixture combination	小黑麦株高 Plant height of triticale/cm	干草产量 Hay yield /(t·hm ⁻²)	NDF /%
B1	122.32±1.40bc	15.60±0.59a	39.77±0.83a
B2	123.38±1.32b	15.23±0.38a	38.88±0.96ab
B3	117.11±1.87c	14.19±0.45ab	39.85±0.80a
B4	124.85±2.16ab	13.97±0.38ab	38.67±0.94ab
B5	129.28±2.67a	12.82±0.39b	36.56±0.50b

注:同列不同小写字母表示不同混播组合间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant differences between different mixture combinations ($P<0.05$).

其他组合无显著差异 ($P>0.05$)；A4 比例下, B2 的干草产量显著 ($P<0.05$) 高于除 B1 外的其余组合；A5 比例下, B1 的干草产量为所有处理中最高, 较其余组合显著 ($P<0.05$) 提高 35.03%~61.02%；A6 比例下, 各组合之间无显著差异。综上可知, 在相同混播比例下, B1 和 B2 组合的干草产量普遍较高。



注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

图 4 混播组合和混播比例交互处理间黑麦枝条数的差异
Fig.4 Tiller number of rye for each mixed combination and mixed sowing ratio treatment

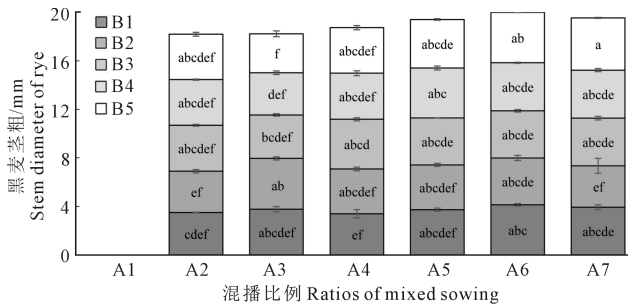


图 5 混播组合和混播比例交互处理间黑麦茎粗的差异

Fig.5 Stem diameter of rye for each mixed combination and mixed sowing ratio treatment

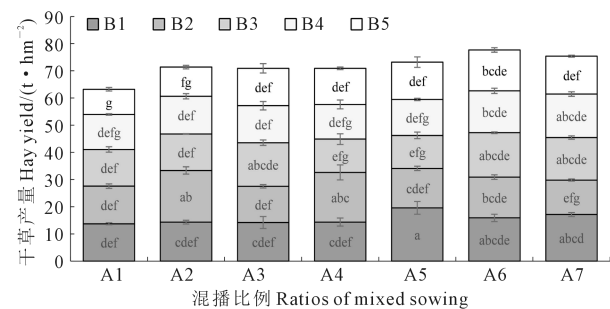


图 6 混播组合和混播比例交互处理间干草产量的差异

Fig.6 Hay yield for each mixed combination and mixed sowing ratio treatment

同一混播比例下, 不同混播组合的粗蛋白含量有不同程度差异 (图 7)。A2 比例下, B3 组合的 CP 显著 ($P<0.05$) 高于 B2；A3 比例下, B3 组合的 CP 显著 ($P<0.05$) 高于 B1；A4 比例下, B2 组合的 CP 最高, 显著 ($P<0.05$) 高于 B4；A5 比例下, B2 组合的 CP 显著 ($P<0.05$) 高于 B1；A6 比例下, B2 组合的 CP 最高, 显著 ($P<0.05$) 高于 B4 和 B5。前述分析表明, 黑麦混播比例低 (A2、A3) 时, B3 组合的 CP 较高, 较其余组合的增幅为 5.96%~30.43%；黑麦混播比例增大 (A4~A6) 时, B2 组合的 CP 较高, 较其余组合的增幅为 13.41%~62.00%。

同一混播比例下, 不同混播组合的中性洗涤纤维含量之间差异有所不同 (图 8)。A2 比例下, B5 组合的 NDF 最低, 但与其他组合无显著差异 ($P>0.05$)；A3 比例下, B5 的 NDF 最低且显著 ($P<0.05$) 低于 B2；A4 比例下, B2 的 NDF 最低, 显著 ($P<0.05$) 低于 B1；A5 比例下, B2、B3 和 B5 的 NDF 较低；A6 比例下, B4 的 NDF 为所有处理最低值 (33.59%), 显著 ($P<0.05$) 低于 B3。综上可知, 黑麦混播比例低 (A2、A3) 时, B5 组合的 NDF 较低；黑麦混播比例增大 (A4~A6) 时, B2 组合的 NDF 较低。

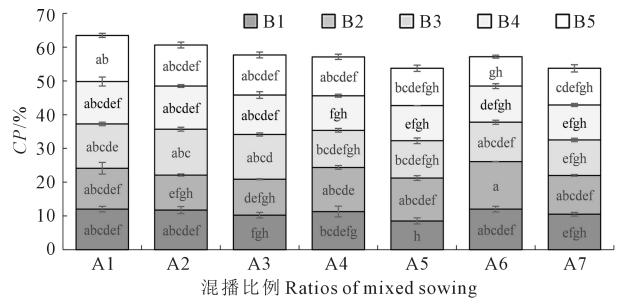


图 7 混播组合和混播比例交互处理间粗蛋白含量的差异

Fig.7 Crude protein content for each mixed combination and mixed sowing ratio treatment

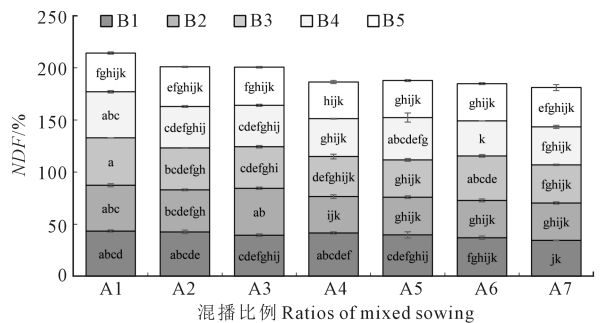


图 8 混播组合和混播比例交互处理间中性洗涤纤维含量的差异

Fig.8 Neutral detergent fiber content for each mixed combination and mixed sowing ratio treatment

2.5 相关性分析

由表 4 可知,干草产量与黑麦茎粗极显著正相关($P < 0.01$),相关系数为 0.250;与黑麦株高和黑麦枝条数显著正相关($P < 0.05$),相关系数分别为 0.248 和 0.202。小黑麦枝条数与小黑麦株高和茎粗呈极显著正相关关系,相关系数分别为 0.705 和 0.672;与黑麦枝条数及茎粗极显著负相关,相关系数分别为-0.666 和-0.227。小黑麦株高与茎粗呈极显著正相关关系,相关系数为 0.947;与黑麦枝条数呈极显著负相关关系,与黑麦茎粗显著负相关,相关系数分别为-0.805 和-0.228。小黑麦茎粗与黑麦枝条数及茎粗呈极显著负相关关系,相关系数分别为-0.807 和-0.264;黑麦枝条数与黑麦株高及茎粗

呈极显著正相关关系,相关系数分别为 0.378 和 0.540;黑麦株高和茎粗呈极显著正相关关系,相关系数为 0.936。

2.6 多准则决策模型——TOPSIS 评价

TOPSIS 评价结果如表 5 所示,A4B2 处理(‘甘农 3 号’小黑麦与‘甘农 1 号’黑麦按 70 : 30 比例混播)优于其他处理,理想贴近度 S_i 为 0.767,其干草产量为 $18.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,在所有处理中排行第 1;CP 为 13.06%,粗纤维含量较低,平均倒伏率仅为 3.3%。因此,‘甘农 3 号’小黑麦与‘甘农 1 号’黑麦以 70 : 30 比例混播是适宜于陇东旱塬区小黑麦与黑麦的立体种植模式,其次为 A6B1(‘甘农 2 号’小黑麦与‘甘农 1 号’黑麦以 50 : 50 比例立体种植)。

表 4 混播群体干草产量与农艺性状的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between hay yield and agronomic traits in mixed sowing population

指标 Indicator	相关系数 Correlation coefficient						
	干草产量 Hay yield	小黑麦枝条数 Tiller number of triticale	小黑麦株高 Plant height of triticale	小黑麦茎粗 Stem diameter of triticale	黑麦枝条数 Tiller number of rye	黑麦株高 Plant height of rye	黑麦茎粗 Stem diameter of rye
干草产量 Hay yield	1.000						
小黑麦枝条数 Tiller number of triticale	-0.135	1.000					
小黑麦株高 Plant height of triticale	-0.155	0.705 **	1.000				
小黑麦茎粗 Stem diameter of triticale	-0.132	0.672 **	0.947 **	1.000			
黑麦枝条数 Tiller number of rye	0.202 *	-0.666 **	-0.805 **	-0.807 **	1.000		
黑麦株高 Plant height of rye	0.248 *	-0.124	-0.054	-0.112	0.378 **	1.000	
黑麦茎粗 Stem diameter of rye	0.250 **	-0.227 **	-0.228 *	-0.264 **	0.540 **	0.936 **	1.000

3 讨论

草产量是建植人工草地的直接价值体现和核心目标^[32],地上部生物量构成了草地生态系统的重要碳库^[33]。牧草的表观农艺性状,如株高、茎粗、枝条数等,是牧草产量的重要构成因素,这些性状由牧草的遗传因素和环境条件共同决定^[34]。根据种植地区的自然条件选择适宜的混播组合,才能有效发挥混播群体的增产增效作用^[35]。株高和枝条数是评价饲用草产量高低的重要指标^[14]。本试验的 5 个混播组合中,B1 在不同混播比例下的表观农艺性状处于中等水平,但其平均干草产量高于其他组合,可能是因为该组合中的‘甘农 2 号’小黑麦品种更适应陇东地区的自然环境,收获期叶量多,叶片面积大,积累的光合产物多,故平均草产量较高。优质饲草的标准为 CP 高,ADF 和 NDF 低^[36]。纤维含量影响牧草消化率和适口性,CP 是决定饲草品质

优劣的重要指标^[37]。本试验从营养成分看,B2 组合在不同混播比例下的平均 CP 较高,而 B1 组合的平均 CP 较低,平均 NDF 最高,前者优于后者。

混播比例适宜才能形成稳定的混播群体,本研究中立体种植模式可以充分发挥小黑麦和黑麦的优越性,在干草产量显著提高(图 1d)的前提下,小黑麦的支撑作用使黑麦的倒伏率降低;但当黑麦的混播比例增大后,混播群体倒伏率显著上升(图 2)。相关性分析表明,混播群体的干草产量与黑麦的相关农艺性状显著正相关,而与小黑麦的农艺性状正向弱相关,说明黑麦对草产量的贡献较大,故在保证倒伏率低的前提下增加黑麦混播比例可以显著提高混播群体的产草量,获得优质高产牧草。随着黑麦比例升高,混播群体的平均干草产量逐渐升高,而比例达到 A5(60 : 40)时,群体平均倒伏率显著升高,故 A4(70 : 30)为控制倒伏率的临界比例;且从平均干草产量上看,该比例与最高的 A6(50 : 50)

表 5 不同处理的综合评价价值及排名

Table 5 Comprehensive evaluation value and ranking of different treatments

处理 Treatment	正理想 解距离 D^+	负理想 解距离 D^-	理想 贴近度 S_i	排序 Ranking	
A1	B1	0.083	0.090	0.520	23
	B2	0.086	0.085	0.498	24
	B3	0.094	0.086	0.475	27
	B4	0.094	0.078	0.455	31
	B5	0.102	0.086	0.458	30
A2	B1	0.076	0.093	0.548	19
	B2	0.055	0.115	0.677	4
	B3	0.072	0.092	0.560	15
	B4	0.071	0.088	0.554	18
	B5	0.086	0.094	0.520	22
A3	B1	0.087	0.076	0.466	28
	B2	0.096	0.082	0.461	29
	B3	0.065	0.095	0.596	11
	B4	0.075	0.084	0.527	20
	B5	0.071	0.091	0.560	16
A4	B1	0.103	0.070	0.404	35
	B2	0.037	0.123	0.767	1
	B3	0.097	0.070	0.421	33
	B4	0.087	0.080	0.478	26
	B5	0.070	0.095	0.576	13
A5	B1	0.061	0.115	0.652	6
	B2	0.059	0.098	0.623	9
	B3	0.084	0.081	0.490	25
	B4	0.085	0.069	0.448	32
	B5	0.071	0.089	0.556	17
A6	B1	0.044	0.112	0.719	2
	B2	0.054	0.103	0.655	5
	B3	0.070	0.093	0.569	14
	B4	0.062	0.104	0.626	8
	B5	0.058	0.107	0.650	7
A7	B1	0.055	0.124	0.693	3
	B2	0.081	0.090	0.526	21
	B3	0.066	0.098	0.598	10
	B4	0.068	0.096	0.586	12
	B5	0.095	0.068	0.417	34

处理间无显著差异,故其综合生产性能较优。本试验中,不同混播比例下黑麦的平均茎粗均高于小黑麦(图 1c),这与刘汉成等^[21-22]的研究结论相反,可能是由于 2022 年项目区气候极度干旱,小黑麦和黑麦生长季(3—5 月)无有效降雨,影响小黑麦的正常生长发育,而黑麦由于抗旱性较强,生长处于优势,所以茎秆变粗。从营养成分看,随着混播群体中小黑麦比例的降低,混合饲草的 CP 呈下降趋势(图 3),这进一步证实小黑麦茎叶的 CP 高于黑麦,与刘汉成^[21]的研究结论一致。另外,在本试验中,随着黑麦混播比例升高,混播群体的 NDF 较小黑麦单播显著下降,说明黑麦茎叶的 NDF 低于小黑麦,这与前人研究有所不同^[21]。通过生产指标和营养指标的综合分析发现,A6 比例下,混播群体的平均干草

产量最高,但其平均倒伏率达到 21%;A4 比例下混播群体倒伏率显著低于 A6,其平均干草产量与 A6 无显著差异,且平均 NDF 显著低于 A2(90:10)和 A3(80:20),因此 A4 为适宜混播比例。小黑麦与黑麦混播进行立体种植,草产量和营养价值均较各自单播有所提高,可在陇东旱塬区示范推广。

4 结 论

1) 陇东旱塬区 B1(‘甘农 2 号’小黑麦与‘甘农 1 号’黑麦混播)和 B2 组合(‘甘农 3 号’与‘甘农 1 号’黑麦混播)以不同比例混播的平均干草产量显著高于 B5(‘藏饲 1 号’小黑麦与‘甘农 1 号’黑麦),较之分别提高 21.68%和 18.80%。

2) 不同小黑麦品种与‘甘农 1 号’黑麦以 A6(50:50)的比例混播时,平均干草产量显著高于小黑麦单播,且高于黑麦单播,增幅分别为 22.94%和 3.05%。

3) 基于草产量、营养价值和倒伏率的综合评价结果表明,‘甘农 3 号’小黑麦与‘甘农 1 号’黑麦以 70:30 的比例混播,进行立体种植时效果最好,适宜在陇东旱塬区及其他气候相似区推广种植。若使用‘甘农 2 号’小黑麦与‘甘农 1 号’黑麦的混播组合,则在 50:50 的混播比例下收获牧草的综合效果最佳。

参 考 文 献:

- [1] 魏昱晴. 陇东地区典型粮-经-饲作物生产效率分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
WEI Y Q. Analysis on the production efficiency of typical cereal-cash-forage crops in Longdong region[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [2] 杨晓, 宋谦, 余小亮, 等. 陇东旱塬区秋播小黑麦与青贮玉米的复种效果[J]. 草业科学, 2019, 36(8): 2127-2134.
YANG X, SONG Q, YU X L, et al. Multiple cropping effects of autumn-sown triticale and silage maize on the drought area of the eastern Gansu Province[J]. Pratacultural Science, 2019, 36(8): 2127-2134.
- [3] 郭灵生, 段小红. 平凉市草食畜牧业发展策略[J]. 中国畜牧业, 2013, (20): 78-79.
GUO L S, DUAN X H. Development strategy of herbivorous animal husbandry in Pingliang City[J]. China Animal Industry, 2013, (20): 78-79.
- [4] 时丽冉, 郭晓丽, 白丽荣, 等. 不同基因型小黑麦苗期耐盐性的评价[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(3): 500-503, 514.
SHI L R, GUO X L, BAI L R, et al. Evaluation of salt tolerance of different genotypes of triticale seedlings[J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(3): 500-503, 514.
- [5] 何广礼, 忠乃. 干旱胁迫对盆栽小黑麦生物学特性及叶绿素含量的影响[J]. 畜牧与饲料科学, 2010, 31(10): 54-56.
HE G L, ZHONG N. Effects of drought stress on biological characteristics and chlorophyll content in potted triticale[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2010, 31(10): 54-56.

- [6] 游永亮, 李源, 赵海明, 等. 种植密度对饲用小黑麦、饲用黑麦种子生产性能的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(7): 1522-1529.
YOU Y L, LI Y, ZHAO H M, et al. Effect of planting density on × *Triticale* Wittmack and *Secale cereale* seed productivity [J]. Pratacultural Science, 2017, 34(7): 1522-1529.
- [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[J]. 大麦与谷类科学, 2010, (3): 1-7.
ZHU X K, SUN J Y, GUO W S, et al. Characteristics of forage yield and quality of different triticale varieties [J]. Barley and Cereal Sciences, 2010, (3): 1-7.
- [8] 杨小辉. 氮素调控对不同收获期小黑麦产量及品质的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011.
YANG X H. Effect of yield and quality with N regulation on triticale of different harvest time[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2011.
- [9] 李冬梅, 田新会, 杜文华. 5 个小黑麦新品系的种子产量及产量构成因素分析[J]. 草地学报, 2016, 24(1): 241-244.
LI D M, TIAN X H, DU W H. Studies on seed yield and yield components of 5 triticale lines [J]. Acta Agrestia Sinica, 2016, 24(1): 241-244.
- [10] 李冬梅, 田新会, 杜文华. 饲草型小黑麦新品系在甘肃临洮灌区的生产性能研究[J]. 草原与草坪, 2016, 36(5): 76-81.
LI D M, TIAN X H, DU W H. Study on the production performance of new forage triticale lines in irrigation area of Lintao, Gansu Province[J]. Grassland and Turf, 2016, 36(5): 76-81.
- [11] 赵雅姣, 田新会, 杜文华. 饲草型小黑麦在定西地区的最佳刈割期[J]. 草业科学, 2015, 32(7): 1143-1149.
ZHAO Y J, TIAN X H, DU W H. Studies on the optimal cutting period of forage triticale in Dingxi area[J]. Pratacultural Science, 2015, 32(7): 1143-1149.
- [12] 郭建文, 李林渊, 田新会, 等. 饲草型小黑麦新品系在甘肃高海拔地区的生产性能和品质研究[J]. 草原与草坪, 2018, 38(4): 72-77.
GUO J W, LI L Y, TIAN X H, et al. Study on the production performance and quality of forage triticale line in different areas of Gansu Province[J]. Grassland and Turf, 2018, 38(4): 72-77.
- [13] 李焰焰, 张桂芳, 张晓涛, 等. 饲用小黑麦在皖西北地区的引种及生产性能[J]. 贵州农业科学, 2010, 38(9): 152-154.
LI Y Y, ZHANG G F, ZHANG X T, et al. Introduction and production performance of forage triticale cultivars in northwest of Anhui Province[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2010, 38(9): 152-154.
- [14] 时丽冉, 崔兴国, 白丽荣. 不同品种小黑麦苗期抗盐碱性能评价[J]. 河北农业大学学报, 2016, 39(2): 87-90, 95.
SHI L R, CUI X G, BAI L R. Evaluation of saline-alkali resistance of different varieties of triticale seedlings[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2016, 39(2): 87-90, 95.
- [15] 孟祥君, 俞联平, 张少平, 等. 甘引 1 号黑麦在高寒地区的适应性评价[J]. 草原与草坪, 2017, 37(6): 72-77.
MENG X J, YU L P, ZHANG S P, et al. Evaluation of the adaptability of *Secale cereal* cv. Ganyin No.1 in alpine areas[J]. Grassland and Turf, 2017, 37(6): 72-77.
- [16] 曹凤娇, 李立芹. PEG 胁迫对黑麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(25): 12431-12433.
CAO F J, LI L Q. Effect of PEG stress on seed germination and seedlings growth of rye (*Secale cereal* L.) [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(25): 12431-12433.
- [17] 郭婷婷. 黑麦对汞铅污染土壤修复能力的实验研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
GUO T T. The experiment study of restoration capability on rye to the Hg, Pb polluted soil[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [18] 章瑞华, 殷朝洲. 冬牧 70 黑麦的性状及其栽培技术[J]. 上海农业科技, 1988, (5): 27-28.
ZHANG R H, YIN C Z. The characters and cultivation techniques of Dongmu 70 rye [J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 1988, (5): 27-28.
- [19] 武慧娟, 孟祥君, 杨浩, 等. 甘引 1 号黑麦在永登县生产性能和营养品质的分析评价[J]. 中国草食动物科学, 2017, 37(3): 37-39.
WU H J, MENG X J, YANG H, et al. Evaluation and analysis on the production performance and nutritional quality of *Secale cereale* L. 'Ganyin No.1' planted in Yongdeng County [J]. China Herbivore Science, 2017, 37(3): 37-39.
- [20] 李国辉, 李志坚, 胡跃高. 青刈黑麦产草量与营养动态分析[J]. 草地学报, 2000, 8(1): 49-54.
LI G H, LI Z J, HU Y G. Study on the dynamics of dry matter and nutrition in rye [J]. Acta Agrestia Sinica, 2000, 8(1): 49-54.
- [21] 刘汉成. 小黑麦与黑麦的甄别及在青藏高原东北缘高寒牧区高产栽培技术研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
LIU H C. Discriminations of triticale and rye, and studies on the high-yield cultivation techniques in the alpine pastoral area of the northeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau, China [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018.
- [22] 刘汉成, 田新会, 杜文华. 小黑麦和黑麦主茎基部第 2 节间解剖结构特征比较[J]. 草原与草坪, 2018, 38(3): 56-61.
LIU H C, TIAN X H, DU W H. Comparison on structural features of second internodes at base of main stem between triticale and rye [J]. Grassland and Turf, 2018, 38(3): 56-61.
- [23] 赵雅姣, 田新会, 杜文华. 饲草型小黑麦遗传多样性的 ISSR 分析[J]. 草地学报, 2017, 25(3): 574-581.
ZHAO Y J, TIAN X H, DU W H. ISSR analysis on genetic diversity of forage triticale genotypes [J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(3): 574-581.
- [24] 李飞, 代明, 段清清, 等. 冰草 EST-SSR 引物和小麦 EST-SSR 引物在黑麦属基因组的通用性分析[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(6): 735-739.
LI F, DAI M, DUAN Q Q, et al. Analysis of transferability of *Agropyron cristatum* L. EST-SSR and wheat EST-SSR primers to *Secale* L. [J]. Journal of triticeae Crops, 2014, 34(6): 735-739.
- [25] 郭晓丽, 白丽荣. 10 个小黑麦品种(系)的遗传多样性分析[J]. 河南农业科学, 2016, 45(2): 26-28.
GUO X L, BAI L R. Genetic diversity of ten varieties (lines) of triticale [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(2): 26-28.
- [26] 刘欣欣. 新疆杂草黑麦主要农艺性状评价和冬春性鉴定[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2020.
LIU X X. Evaluation of main agronomic traits and identification of springness and winterness in *Secale cereale* subsp. *segetale* [D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science & Technology, 2020.
- [27] 赵方媛, 田新会, 杜文华. 小黑麦萌发期抗旱条件模拟和抗旱指标的筛选[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(2): 96-102.
ZHAO F Y, TIAN X H, DU W H. Screening on drought simulation conditions and drought-resistant parameters at germination stage of triticale [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(2): 96-102.