DOI: 10. 11686/cyxb2025458
http://cyxb. magtech. com. cn
刘怡曼, 张红妹, 邹怡雯, 等. 豫北 20 个秋播饲用燕麦品种生产性能及气生根特性. 草业学报, 2026, 35(11): 132－144.
LIU Yi-man, ZHANG Hong-mei, ZOU Yi-wen, *et al*. Production performance and aerial root characteristics of 20 autumn-sown forage oat varieties in northern Henan. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(11): 132－144.

豫北 20 个秋播饲用燕麦品种生产性能及气生根特性

刘怡曼[1], 张红妹[1], 邹怡雯[1], 王军力[1], 刘伯帅[1,2,3], 孙浩[1,2,3*], 李德锋[1,2,3*]
(1. 河南农业大学动物科技学院, 河南 郑州 450046; 2. 河南省草地资源创新与利用重点实验室, 河南 郑州 450046; 3. 河南省牧草工程技术研究中心, 河南 郑州 450046)

摘要: 为筛选适宜豫北地区秋播的饲用燕麦品种, 选择市场上主推的 20 个饲用燕麦品种进行秋播, 测定越冬率、分蘖数、气生根、倒伏程度、产量和品质等指标, 分析了气生根数量与倒伏程度的关系。结果表明: 1)各品种越冬率为 88. 0%～100. 0%, 其中 19 个品种的越冬率高于 95. 0%; 越冬前分蘖数为 2. 9～5. 0 个·株$^{-1}$, 越冬后分蘖数增加至 5. 6～28. 1 个·株$^{-1}$, 其中麦迪逊的分蘖数最多, 为 28. 1 个·株$^{-1}$, 显著高于其他品种(P<0. 05)。2)各品种于 5 月 7 日－24 日达到乳熟期收获, 生育期为 191～208 d, 株高为 1. 28～1. 59 m, 干草产量为 9. 68～15. 61 t·hm^{-2}, 其中甜燕 75 产量最高, 其次为甜燕 3 号和麦迪逊, 均高于 15 t·hm^{-2}。3)第 1 茎节生出的有效气生根数为 0. 15～2. 70 条, 无效气生根数为 0. 45～3. 05 条, 气生根入土半径为 0. 00～8. 04 mm; 第 2 茎节生出的气生根较少; 乳熟期各品种均无倒伏, 蜡熟期出现倒伏, 倒伏程度与第 1 层有效气生根数显著负相关(P<0. 05), 与第 2 茎节节长显著正相关(P<0. 05)。4)各品种粗蛋白含量为 9. 49%～12. 15%, 中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量分别为 58. 18%～61. 33%、31. 51%～36. 28%, 其中, 牧丰、甜燕 70、刀客等品种的营养品质主成分得分较高。5)聚类分析可将 20 个品种划分为 5 大类群, 其中, 第Ⅴ类群(麦迪逊)越冬后分蘖数最多, 第Ⅱ类群(贝利、甜燕 3 号和锋利等)综合表现较好。综合认为, 甜燕 3 号、锋利和贝利的越冬率和干草产量较高, 抗倒伏性强, 饲用品质较好, 适宜在豫北地区秋播种植。

关键词: 秋播; 饲用燕麦; 气生根; 生产性能; 抗倒伏性

Production performance and aerial root characteristics of 20 autumn-sown forage oat varieties in northern Henan

LIU Yi-man[1], ZHANG Hong-mei[1], ZOU Yi-wen[1], WANG Jun-li[1], LIU Bo-shuai[1,2,3], SUN Hao[1,2,3*], LI De-feng[1,2,3*]
1. *College of Animal Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou* 450046, *China*; 2. *Henan Key Laboratory of Innovation and Utilization of Grassland Resources, Zhengzhou* 450046, *China*; 3. *Henan Forage Engineering Technology Research Center, Zhengzhou* 450046, *China*

Abstract: The aim of this study was to identify oat (*Avena sativa*) varieties suitable for autumn sowing in central China. A field experiment was conducted from October 2023 to May 2024, with seeds of 20 oat varieties sown in autumn in Henan Province, central China. The following indexes were measured: Winter survival rate, tiller number, aerial roots, lodging degree, yield, and quality. The results show that: 1) The winter survival rate ranged from 88. 0% to 100. 0%, and 19 varieties had a winter survival rate higher than 95. 0%. The average number of tillers per plant increased from 2. 9－5. 0 before winter to 5. 6－28. 1 after winter. Among the 20 tested varieties,

收稿日期: 2025-11-10; 改回日期: 2026-01-05
基金项目: 河南省科技攻关项目(262102110268)和财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系(CARS-34)资助。
作者简介: 刘怡曼(2004－), 女, 河南安阳人, 在读本科。E-mail: lymanve@163. com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: sunhao@henau. edu. cn; Leadephone@126. com

Madison had the highest tiller number (28.1 tillers per plant), which was significantly higher than that of other varieties ($P<0.05$). 2) All varieties were harvested at the milk stage between May 7 and May 24. The average plant height was 1.28－1.59 m, and the average hay yield was 9.68－15.61 t·ha^{-1}. Tianyan 75 had the highest yield, followed by Tianyan 3 and Madison, and all three of these varieties had hay yields greater than 15 t·ha^{-1}. 3) The average number of effective aerial roots generated from the first stem node of each variety was 0.15－2.70, whereas the average number of ineffective aerial roots was 0.45－3.05. The average soil-penetrating radius of aerial roots was 0.00－8.04 mm. Few aerial roots grew from the second stem node. None of the oat varieties lodged at the milk stage, whereas lodging did occur at the wax stage. The extent of lodging was significantly negatively correlated with the number of effective aerial roots in the first layer ($P<0.05$), and significantly positively correlated with the length of the second internode ($P<0.05$). 4) The average crude protein content of the various varieties ranged from 9.49%－12.15%, and the contents of neutral detergent fiber and acid detergent fiber ranged from 58.18%－61.33% and 31.51%－36.28%, respectively. Among the 20 tested varieties, Mufeng, Tianyan 70, and Daoke had the highest principal component scores for nutritional quality. 5) A cluster analysis divided the 20 oat varieties into five groups. The single variety in group Ⅴ (Madison) had the most tillers after winter, whereas the varieties in group Ⅱ (including Baler, Tianyan 3 and Sharp, among others) showed the best overall performance. In conclusion, our results show that Tianyan 3, Sharp, and Baler have high winter survival rate and hay yield, strong lodging resistance, and good forage quality, so they are most suitable for autumn sowing and planting in central China.

Key words: autumn sown; forage oat; aerial root; production performance; lodging resistance

河南省为牛羊养殖和新兴奶业大省，截至2023年底，河南省奶牛存栏40万头，肉牛存栏400万头，羊饲养量达4600万只，如此大规模的牛羊饲养量需要充足的优质饲草支持。但是，河南省优质饲草自给率低，严重依赖进口或从其他省份调运。饲用燕麦(*Avena sativa*)作为一种高效、优质的饲草资源，具有产量高、品质优良、适口性好等优点，可调制干草和进行青贮，是被广泛种植和应用的高产优质饲草[1]。此外，饲用燕麦富含过瘤胃蛋白、可溶性纤维和可溶性碳水化合物，饲料利用效率高，对提升奶牛的产奶量和维持乳蛋白率具有显著效果，是奶牛养殖中主要的粗饲料之一[2]。扩大本地饲用燕麦种植面积，能降低饲草成本，增加牛羊养殖效益，助力牛羊产业纾困。目前，河南省秋播饲用燕麦研究较少，亟需开展相关研究，弥补河南优质饲草不足，提升奶业水平。

近年来，随全球气候变化，大风和强降水等极端天气频发，燕麦大面积倒伏问题十分突出[3]。在河南省，燕麦5月进入灌浆期，此时常见强降水和强风天气，很容易出现倒伏现象。倒伏后，叶片光合速率下降，同时传粉和籽粒发育也受到不利影响，不仅会导致产量和品质下降，也影响机械收获[4-5]，严重制约燕麦草产业的发展。因此，要实现燕麦的高产和优产，必须筛选高产优质、抗倒伏能力强的品种。研究发现，燕麦倒伏主要发生在浇灌或降水后，此时土壤松软，根的固着力减弱[6]。在玉米(*Zea mays*)、小麦(*Triticum aestivum*)、谷子(*Setaria italica*)等作物上发现，气生根对植株的固定和支撑作用较大，气生根越多，抗倒伏性越强[7-9]。本团队前期研究发现，燕麦茎基部产生的气生根可增强植株稳定性，提高抗倒伏性，因此，可以将气生根性状作为燕麦抗倒伏评价指标进行研究。本研究的目的在于，通过对当前市场主推的20个燕麦品种进行秋播，测定越冬率、气生根、抗倒伏性和产量品质等指标，筛选出耐寒性和抗倒伏性强，且高产优质的燕麦品种，为河南燕麦种植提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于2023年10月至2024年5月在河南省新乡市原阳县小吴庄村(35°06′ N，113°56′ E)进行，该地属于温带大陆性季风气候，年平均气温15.5 ℃，极端低温出现在12－翌年2月(－13～－7 ℃)，年日照时数2043 h以上，年降水量为440～690 mm，无霜期225 d。试验期间气象情况见图1，其中10 ℃以上积温为774 ℃，0 ℃以上积温为2504 ℃。土壤为壤土，有机质、碱解氮、速效磷、速效钾的含量分别为1.5%、73.5 mg·kg^{-1}、18.0 mg·kg^{-1}、106.0

$mg \cdot kg^{-1}$。

1.2 试验材料与试验设计

参试燕麦品种共20个(表1)。试验采用完全随机区组设计,4个重复,每个试验小区面积为3 m×10 m=30 m^2。2023年10月20日使用小型条播机(xc-176,山东)进行播种,行距20 cm,播种深度4 cm左右。播种量=90 $kg \cdot hm^{-2}$/(种子净度×发芽率),各品种种子净度、发芽率和播种量见表1。播前整地时深施(25~30 cm)氮磷钾复合肥450 $kg \cdot hm^{-2}$,其中氮含量为24%、P_2O_5含量为14%、K_2O含量为7%。冬至前后灌冬水,在返青期、拔节期和孕穗期各灌溉1次。

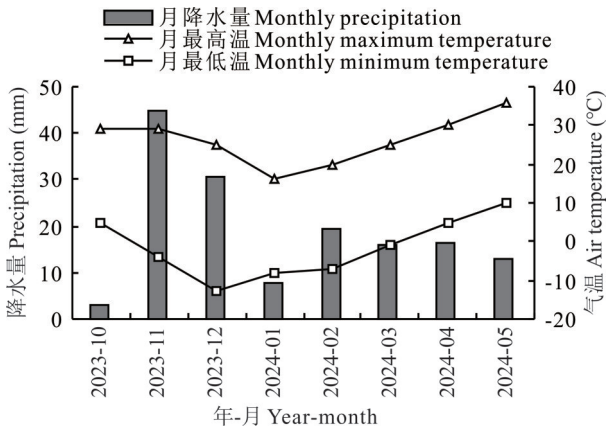


图1 试验地气温和降水量

Fig. 1 Air temperature and precipitation in test location

表1 不同燕麦品种发芽率、净度、播种量及原产地

Table 1 Germination percentage, purity, seeding rate and country of origin of different oat varieties

品种 Varieties	发芽率 Germination rate (%)	净度 Purity (%)	播种量 Seeding rate ($kg \cdot hm^{-2}$)	原产地 Origin	品种 Varieties	发芽率 Germination rate (%)	净度 Purity (%)	播种量 Seeding rate ($kg \cdot hm^{-2}$)	原产地 Origin
甜燕2+ Tianyan 2+	99.00	95.60	95.09	加拿大 Canada	特牧 Temu	67.00	95.50	140.66	加拿大 Canada
甜燕3号 Tianyan 3	99.00	96.20	94.50	加拿大 Canada	三星 Three stars	99.00	94.30	96.40	加拿大 Canada
甜燕70 Tianyan 70	97.00	97.40	95.26	加拿大 Canada	牧丰 Mufeng	95.00	91.20	103.88	加拿大 Canada
甜燕75 Tianyan 75	99.00	98.50	92.29	加拿大 Canada	贝利 Baler	96.00	97.80	95.86	加拿大 Canada
Mongan	93.00	97.60	99.15	加拿大 Canada	爱沃 Everleaf	98.00	96.50	95.17	美国 America
禾王 King cereals	97.00	94.30	98.39	加拿大 Canada	俄罗斯 Russia	89.00	93.20	108.50	俄罗斯 Russia
锋利 Sharp	100.00	96.50	93.26	加拿大 Canada	坝燕4 Bayan 4	84.00	91.60	116.97	中国 China
刀客 Daoke	61.00	94.20	156.63	美国 America	坝燕14 Bayan 14	57.00	95.60	165.16	中国 China
格莱德 Gelaide	57.00	97.10	162.61	加拿大 Canada	坝燕18 Bayan 18	82.00	96.80	113.38	中国 China
青海444 Qinghai 444	82.00	93.20	117.76	澳大利亚 Australia	麦迪逊 Madison	91.00	98.80	100.10	加拿大 Canada

1.3 测定指标与方法

越冬率:10月20日进行播种,在同一试验地内,将参试的每个品种种植于草方格内,每块方格64个小格(每个小格50 mm×50 mm)为1个重复,每个品种4个重复,每个小格内播2~3粒种子。出苗后第10天定苗,每小格内保留1株燕麦幼苗;11月23日(初霜期)统计每块方格内的成活苗数M_1;于次年3月5日(返青期)统计每块方格内的成活苗数M_2,越冬率=(M_2/M_1)×100%。

分蘖数:11月23日(初霜期)在每个小区(避开边缘)随机选取20株燕麦挖出,测定越冬前分蘖数。翌年3月5日(返青期)用同样方法在每个小区随机选取20株成活的燕麦挖出,测定越冬后的分蘖数。

叶绿素值(soil and plant analyzer development, SPAD):分别于2023年11月23日(越冬前),2024年3月5日(返青期),4月9日(拔节期),在每个小区随机选20株,用叶绿素测定仪(SPAD-502,日本)测定主茎第三叶中部的SPAD值。

株高与产量:每个参试品种均于乳熟期收获,收获时,每个小区随机选20个植株,测株高,每个小区去除边行和地头后,随机选取4 m^2样方刈割,立即称鲜重,并取1 kg鲜草样带回实验室,烘箱内105 ℃杀青30 min,65 ℃烘干至恒重,称干重计算干鲜比和干草产量。

节长、有效气生根数与入土半径：乳熟期，每个小区随机选取 20 株燕麦，分别测量每株主茎的茎基部第 1、2 茎节节长，并测量入土气生根条数、气生根入土位置离主茎的距离。

倒伏程度：于蜡熟期测定倒伏率，并将倒伏程度分为 4 级：倒伏率 0～3% 为Ⅰ级，倒伏率 4%～20% 为Ⅱ级，倒伏率 21%～40% 为Ⅲ级，倒伏率 41%～100% 为Ⅳ级[10]。

养分测定与品质分级：粉碎测产时烘干的草样，用近红外扫描法[11]测定粗蛋白、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、粗灰分、半纤维素等含量，计算相对饲喂价值（relative feeding value，RFV）和相对牧草质量（relative forage quality，RFQ）。

$$RFV = DMI \times DDM / 1.29,\ DMI = 120/NDF,\ DDM = 88.9 - 0.779 \times ADF$$

$$RFQ = 1.9499 \times [(120/NDF) \times (88.9 - 0.779 \times ADF)/1.29] - 67.03$$

式中：*DMI* 为干物质采食量（dry matter intake），*DDM* 为可消化干物质（digestible dry matter），*ADF* 为酸性洗涤纤维（acid detergent fiber），*NDF* 为中性洗涤纤维（neutral detergent fiber）。

营养品质分级参考中国畜牧业协会团体标准（T/CAAA 002－2018）[12]。

1.4　数据处理与统计分析

采用 SPSS 26.0 和 Microsoft Excel 2019 软件，对各品种的营养指标进行主成分分析，并计算各品种营养品质的主成分得分（principal components score，PCS），对气生根、抗倒伏相关性状和干草产量等指标进行单因素方差分析，结果以“平均值±标准差”来表示，采用 Duncan's 法进行多重比较，$P<0.05$ 时有显著性差异。对越冬率、SPAD 值、分蘖数、株高、干草产量、饲用品质、有效气生根数和第 2 茎节节长进行聚类分析，采用欧氏距离法，构建树形图。用隶属函数法[13]，以越冬率、干草产量、饲用品质等指标对各品种进行综合评价，隶属函数值的计算公式为：

$$X(\mu_1) = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}},\ X(\mu_2) = 1 - X(\mu_1)$$

式中：$X(\mu_1)$ 为各指标呈正相关的隶属函数值，$X(\mu_2)$ 为各指标呈负相关的隶属函数值。X 为样品各指标测定值；X_{max} 和 X_{min} 分别为所有燕麦品种该指标对应的最大值和最小值。

2　结果与分析

2.1　不同燕麦品种的分蘖数、越冬率和 SPAD 值

各品种越冬率为 88.0%～100.0%，其中，19 个品种的越冬率高于 95%，青海 444 的越冬率最低，为 88.0%，显著低于其他 19 个品种（$P<0.05$）。越冬前，各品种分蘖数为 2.9～5.0 个·株$^{-1}$，越冬后，各品种的分蘖数增至 5.6～28.1 个·株$^{-1}$，其中，麦迪逊越冬后的分蘖数最多，为 28.1 个·株$^{-1}$，显著高于其他 19 个品种（$P<0.05$）。随着生育期的推进，各品种的 SPAD 值都呈逐渐升高的趋势，越冬前，各品种 SPAD 值为 20.42～27.41，品种间差异不显著（$P>0.05$），返青期，SPAD 值增至 23.80～31.90，拔节期 SPAD 值增至 33.06～44.06，其中，SPAD 值较高的 3 个品种显著高于 SPAD 值较低的 2 个品种（$P<0.05$，表 2）。

2.2　不同燕麦品种的生产性能

各品种生育期差别较大，最早熟的坝燕 14 于 4 月 16 日抽穗，5 月 7 日达到乳熟期收获，生育期 191 d；最晚熟的爱沃 5 月 11 日抽穗，5 月 24 日达到乳熟期收获，生育期 208 d。各品种的鲜草产量为 52.88～67.15 t·hm^{-2}，干鲜比为 0.17～0.24，干草产量为 9.68～15.61 t·hm^{-2}，其中，甜燕 75、甜燕 3 号、麦迪逊等 6 个品种的干草产量较高，显著高于其余 14 个品种。各品种株高为 1.28～1.59 m，其中格莱德（1.59 m）、牧丰（1.55 m）、俄罗斯（1.54 m）、特牧（1.53 m）较高（表 3）。

2.3　不同燕麦品种的营养品质与主成分分析

各品种粗蛋白含量为 9.49%～12.15%，其中坝燕 18 含量最高，为 12.15%，其次为 Mongan 和禾王，分别为 11.86% 和 11.80%。各品种 NDF、ADF 含量分别为 58.18%～61.33%、31.51%～36.28%，其中牧丰的 NDF 含

表2 不同燕麦品种的分蘖数、越冬率和叶绿素值

Table 2 The number of tillers, winter survival rate and SPAD of different oat varieties

品种 Variety	分蘖数 Tiller number		越冬率 Winter survival rate (%)	叶绿素值 Soil and plant analyzer development (SPAD)		
	越冬前 Before winter	越冬后 After winter		越冬前 Before winter	返青期 Regreening stage	拔节期 Jointing stage
甜燕70 Tianyan 70	3.6±0.3bcde	6.8±0.3ef	100.0±0.00a	26.33±3.58a	29.30±1.70abc	35.06±0.15bc
Mongan	2.9±0.3e	5.6±0.5f	100.0±0.00a	24.46±6.31a	29.35±3.46abc	33.17±4.81c
格莱德 Gelaide	4.0±0.4abcde	13.3±0.5b	100.0±0.00a	24.49±4.40a	26.90±0.99abcd	38.93±1.69abc
特牧 Temu	3.9±0.5bcde	8.5±0.5cde	100.0±0.00a	24.48±4.98a	27.30±2.69abcd	41.16±2.63ab
坝燕14 Bayan 14	4.3±0.5abcd	10.1±0.3c	100.0±0.00a	25.31±2.22a	27.00±1.13abcd	34.63±0.88bc
麦迪逊 Madison	4.1±0.6abcd	28.1±3.4a	100.0±0.00a	23.76±4.53a	26.95±3.75abcd	44.06±0.18a
俄罗斯 Russia	3.4±0.3cde	9.1±0.3cde	95.3±2.74a	27.05±0.75a	29.20±4.38abcd	39.45±1.08abc
牧丰 Mufeng	4.5±0.6abc	8.5±0.3cde	97.9±4.17a	23.84±3.11a	25.05±2.19cd	34.18±0.58bc
爱沃 Everleaf	3.6±0.4bcde	9.2±0.4cde	98.0±2.37a	21.46±2.18a	31.35±1.34ab	38.32±5.37abc
甜燕2+ Tianyan 2+	5.0±0.4a	6.9±0.2ef	98.1±3.91a	21.26±0.20a	29.30±2.55abc	35.93±1.54bc
坝燕4 Bayan 4	3.3±0.3de	5.8±0.2f	98.4±1.82a	27.41±3.30a	29.35±0.49abc	33.06±4.82c
锋利 Sharp	4.6±0.2ab	9.2±0.6cde	98.8±1.59a	23.87±2.16a	26.55±1.20abcd	35.52±4.88bc
甜燕75 Tianyan 75	4.0±0.4abcd	9.2±0.3cde	98.8±0.80a	24.21±4.23a	25.85±1.06bcd	39.49±0.04abc
禾王 King cereals	3.4±0.5cde	9.9±0.9cd	98.8±1.50a	21.93±0.04a	30.40±1.98abc	38.08±1.45abc
三星 Three stars	4.3±0.1abcd	7.7±0.1def	99.2±0.90a	24.72±4.95a	29.90±2.97abc	36.58±1.24bc
坝燕18 Bayan 18	3.6±0.2bcde	9.9±0.3cd	99.5±1.06a	20.89±2.42a	23.80±0.71d	38.86±6.87abc
刀客 Daoke	3.8±0.3bcde	10.1±0.2cd	99.5±1.02a	24.79±2.39a	31.90±1.98a	34.12±1.51bc
贝利 Baler	4.0±0.3abcde	9.8±0.1cd	99.6±0.88a	20.42±0.93a	30.45±2.19abc	38.92±0.31abc
甜燕3号 Tianyan 3	4.4±1.1abcd	9.2±1.4cde	99.6±0.78a	24.32±5.57a	28.45±1.34abcd	39.84±3.45abc
青海444 Qinghai 444	3.3±0.6de	7.8±0.4def	88.0±9.60b	24.61±4.74a	26.05±2.05bcd	40.93±2.99ab

注：同列中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$). The same below.

量最低。牧丰的RFV、RFQ最高，其次为甜燕70和刀客，上述3个品种的RFV、RFQ均显著高于爱沃和甜燕75，其余品种间差异不显著(表4)。对20个燕麦品种的营养指标进行主成分分析，提取出2个主成分，方差贡献率分别为54.66%、24.93%，累积贡献率为79.59%(表5)。第一主成分中，RFQ、NDF影响较大，主要反映纤维品质和饲用价值。第二主成分中半纤维素、粗灰分、粗蛋白影响较大，侧重反映基础营养成分(表6)。主成分分析中(图2)，牧丰的NDF、ADF含量较低，品质较好，与其他品种分离；爱沃的粗蛋白、粗灰分含量较低，与其他品种分离；三星的半纤维素含量最低，与其他品种分离，其他品种营养品质差别不大，聚在一起。主成分得分较高的品种(牧丰、甜燕70、刀客)，其燕麦干草质量分级也相对较高(表4)。

2.4 不同燕麦品种的气生根、节长和抗倒伏性

乳熟期收获时，田间观察发现，各品种均未出现倒伏现象，蜡熟期出现倒伏。第1茎节生出的第1层有效气生根数较多，为0.15～2.70条，无效气生根数为0.45～3.05条，气生根入土半径为0.00～8.04 mm；第2茎节生出的第2层有效和无效气生根均较少；甜燕3号、贝利等品种的有效气生根数较多，倒伏程度较低(表7)。甜燕2+、甜燕70、刀客等品种的第2茎节较长，倒伏较为严重；甜燕3号、俄罗斯、坝燕14等品种的第2茎节较短，倒伏程度相对较轻。相关分析显示(图3)，倒伏程度与第1层有效气生根数显著负相关($P<0.05$)，与第2茎节节长显著正相关($P<0.05$)，第1茎节节长与第2茎节节长显著正相关($P<0.05$)。

表 3　不同燕麦品种的抽穗期、收获期及生产性能

Table 3　Heading stage, harvest time and production performance of different oat varieties

品种 Variety	抽穗期 Heading date（月-日 Month-day）	收获期 Harvest date（月-日 Month-day）	生育期 Growth period（d）	株高 Plant height（m）	鲜草产量 Fresh grass yield（$t\cdot hm^{-2}$）	干草产量 Hay grass yield（$t\cdot hm^{-2}$）	干鲜比 Dry to fresh ratio
甜燕 75 Tianyan 75	5-07	5-22	206	1.42±0.03cde	65.50±1.18ab	15.61±0.28a	0.24
甜燕 3 号 Tianyan 3	5-03	5-22	206	1.48±0.02bc	64.79±3.14ab	15.43±0.75a	0.24
麦迪逊 Madison	5-08	5-22	206	1.51±0.02bc	65.69±1.36ab	15.01±0.31a	0.23
锋利 Sharp	5-03	5-22	206	1.49±0.04c	62.35±1.72bc	14.97±0.41a	0.24
贝利 Baler	5-07	5-22	206	1.44±0.06cd	61.91±2.49bc	14.28±0.58a	0.23
甜燕 2+ Tianyan 2+	5-02	5-22	206	1.48±0.03cd	59.06±3.23cd	14.12±0.77a	0.24
甜燕 70 Tianyan 70	5-04	5-18	202	1.35±0.03efg	60.76±1.10ab	12.49±0.21b	0.21
俄罗斯 Russia	4-30	5-18	202	1.54±0.04ab	53.88±4.20e	12.27±0.96b	0.23
坝燕 14 Bayan 14	4-16	5-07	191	1.35±0.03efg	55.42±0.91de	12.20±0.20b	0.22
刀客 Daoke	4-27	5-18	202	1.49±0.05cd	52.88±1.85e	12.14±0.42b	0.23
爱沃 Everleaf	5-11	5-24	208	1.31±0.04fg	54.64±3.35de	12.02±0.74b	0.22
青海 444 Qinghai 444	4-20	5-07	191	1.49±0.03bc	57.89±1.17cd	11.94±0.24bc	0.21
特牧 Temu	4-24	5-11	195	1.53±0.03ab	65.51±1.33ab	11.83±0.24bc	0.18
牧丰 Mufeng	5-05	5-18	202	1.55±0.02ab	57.24±3.40de	11.33±0.67bc	0.20
禾王 King cereals	5-06	5-18	202	1.35±0.03efg	67.15±1.27a	11.10±0.21bcd	0.17
三星 Three stars	4-29	5-18	202	1.41±0.06de	58.87±2.53cd	10.96±0.47bcd	0.19
Mongan	4-26	5-11	195	1.32±0.03fg	61.61±3.93bc	10.42±0.66cd	0.17
格莱德 Gelaide	5-05	5-18	202	1.59±0.07a	56.17±1.20de	10.39±0.22cd	0.18
坝燕 18 Bayan 18	4-19	5-07	191	1.37±0.05ef	53.89±1.71e	10.16±0.32d	0.19
坝燕 4 Bayan 4	4-26	5-11	195	1.28±0.02g	54.72±0.29de	9.68±0.05d	0.18

2.5　相关性、聚类分析和综合评价

相关性分析显示（图 4），株高、干草产量均与越冬前分蘖数显著正相关（$P<0.05$）；拔节期 SPAD 值与越冬后分蘖数显著正相关（$P<0.05$）。聚类分析（图 5）表明，在欧氏距离为 9.5 处，可将 20 个燕麦品种划分为 5 大类群。第Ⅰ类群包括禾王、甜燕 70 等 10 个品种，各指标均表现一般；第Ⅱ类群包括贝利、甜燕 3 号和锋利等 7 个品种，综合表现均较好；第Ⅲ类群包括牧丰，其营养品质主成分得分最高（表 4）；第Ⅳ类群包括青海 444，其越冬率最低（表 2）；第Ⅴ类群包括麦迪逊，其越冬后分蘖数最多（表 2）。采用隶属函数法对 20 个燕麦品种进行综合评价（表 8），甜燕 3 号隶属值最高，其次为锋利、贝利和牧丰，其越冬率、干草产量、营养品质和抗倒伏性等均表现较好。

3　讨论

3.1　不同燕麦品种的越冬能力和生产性能

燕麦秋播比春播具有明显优势，其收获期更早，产量更高[14]，本试验中干草产量可达 15 $t\cdot hm^{-2}$ 以上，比春播增产 50% 以上[15]，因此，燕麦在河南省秋播更具优势。燕麦的越冬能力是决定其能否秋播种植的首要限制因子。燕麦幼苗可忍受 −4～−2 ℃低温，但抵御 −4 ℃以下低温的能力较差[16]；美国北方地区、山东黄河三角洲、甘肃庆阳地区均有秋播的燕麦因持续低温而死亡[17−19]的现象。姚晋等[20]认为，不同燕麦品种的抗寒性差别很大，抗寒性强的品种在河南省可安全越冬。本试验期间，最低温度为 −13 ℃，20 个品种中有 19 个品种的越冬率高于 95.0%，说明在豫北地区秋播时大部分燕麦品种能安全越冬。燕麦的分蘖能力较强，越冬前产生的分蘖可以抽穗形成生殖枝，对产量贡献较大，越冬后产生的分蘖部分不能抽穗，说明越冬前分蘖数是影响干草产量的重要因

表 4　不同燕麦品种的营养成分含量、主成分得分及分级情况

Table 4　Nutrient content, principal component scores and classification of different oat varieties

品种 Variety	CP (%)	NDF (%)	ADF (%)	HC (%)	Ash (%)	RFV	RFQ	PCS	分级 Grade
牧丰 Mufeng	9.87±0.80cd	58.18±0.67b	31.51±0.62c	27.71±0.52a	9.75±0.53d	99.74±2.26a	133.61±3.22a	−1.67	一级 Grade1
甜燕 70 Tianyan 70	11.31±0.90abc	58.45±0.87b	33.27±1.34b	27.35±1.44a	11.23±0.52abc	98.82±1.06a	128.44±3.29ab	−0.51	一级 Grade1
刀客 Daoke	10.69±1.11abcd	58.40±1.66b	33.80±0.41b	27.51±0.96a	11.52±0.68ab	98.27±1.88ab	127.43±5.34ab	−0.46	一级 Grade1
锋利 Sharp	10.65±0.93abcd	60.08±1.30ab	34.01±1.96ab	28.29±1.88a	10.95±0.78abcd	97.28±2.36abc	121.40±4.12bcde	−0.33	二级 Grade2
贝利 Baler	10.52±0.98abcd	58.93±1.27ab	34.48±0.46ab	27.41±0.74a	11.49±0.55abc	97.64±1.74abc	123.99±4.36abc	−0.22	一级 Grade1
坝燕 14 Bayan 14	11.21±0.41abc	59.32±1.92ab	34.29±1.44ab	27.39±1.04a	10.86±0.48abcd	98.05±4.19ab	123.32±8.20abcd	−0.22	二级 Grade2
爱沃 Everleaf	9.49±0.43d	60.90±0.58ab	34.74±0.72ab	27.63±0.42a	10.10±0.34cd	93.17±0.88c	117.19±3.27cde	−0.22	二级 Grade2
俄罗斯 Russia	10.11±0.60bcd	59.19±1.79ab	34.42±2.03ab	27.57±2.16a	11.69±1.07ab	96.53±2.90abc	123.32±5.16abcd	−0.20	二级 Grade2
甜燕 2＋ Tianyan 2＋	10.40±1.16bcd	59.64±2.02ab	35.19±1.59ab	27.76±1.02a	10.74±0.63bcd	97.38±3.07abc	120.16±8.97bcde	−0.19	二级 Grade2
甜燕 3 号 Tianyan 3	10.65±1.24abcd	58.36±2.69b	34.66±1.58ab	26.20±2.00a	11.17±0.59abc	97.18±4.71abc	125.73±11.57abc	−0.18	一级 Grade1
坝燕 4 Bayan 4	10.64±0.79abcd	58.30±0.36b	34.76±0.94ab	27.06±0.67a	11.87±1.25ab	97.53±1.98abc	125.31±1.83abc	−0.10	一级 Grade1
青海 444 Qinghai 444	11.38±0.39abc	58.76±1.44ab	34.40±0.35ab	26.68±1.26a	11.26±0.38abc	97.01±1.79abc	124.76±5.16abc	−0.02	一级 Grade1
格莱德 Gelaide	10.78±1.27abcd	59.04±1.45ab	34.30±1.02ab	27.65±1.02a	12.15±1.30ab	95.92±2.38abc	124.09±5.77abc	0.03	二级 Grade2
三星 Three stars	11.40±0.77abc	58.31±2.70b	34.93±0.22ab	26.11±1.64a	11.96±0.42ab	98.38±3.74ab	125.20±9.40abc	0.19	一级 Grade1
特牧 Temu	11.25±0.98abc	60.26±1.99ab	34.61±2.64ab	27.36±1.42a	11.02±1.25abcd	94.95±4.60abc	119.59±9.94bcde	0.21	二级 Grade2
麦迪逊 Madison	11.24±1.57abc	60.42±1.59ab	34.72±0.86ab	27.90±1.37a	12.23±0.93a	95.27±1.51abc	118.75±4.79bcde	0.47	一级 Grade1
坝燕 18 Bayan 18	12.15±1.22a	60.93±1.16ab	35.47±0.56ab	27.68±0.60a	11.16±0.62abc	95.47±2.36abc	115.40±3.96cde	0.69	二级 Grade2
Mongan	11.86±0.87ab	59.94±1.53ab	35.50±0.42ab	26.87±1.17a	11.94±1.02ab	94.79±1.26abc	118.40±4.41bcde	0.78	二级 Grade2
甜燕 75 Tianyan 75	10.78±1.67abcd	61.32±1.03a	36.28±0.71a	27.90±0.85a	12.13±0.97ab	93.42±0.17c	112.37±2.96e	0.93	二级 Grade2
禾王 King cereals	11.80±0.62ab	61.33±1.09a	36.10±1.81a	27.86±1.45a	11.73±0.74ab	93.77±0.65bc	112.75±5.15de	1.02	二级 Grade2

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；HC：半纤维素 Hemicellulose；Ash：粗灰分 Crude ash；RFV：相对饲喂价值 Relative feeding value；RFQ：相对牧草质量 Relative forage quality；PCS：主成分得分 Principal component score.

素[21]，饲用燕麦新品种选育时应侧重选择抗寒性强及越冬前分蘖较多的品种。

3.2　不同燕麦品种的营养品质

饲草的营养品质是其饲用价值的直接体现[22]。蛋白质是家畜必需的营养物质，特别是在奶牛生产中对饲草的CP含量要求更高，因此，CP含量是饲用燕麦品种选择的重要依据[23]。本研究中，CP含量为9.49%～12.15%，与我国大部分地区的燕麦品种相近[24-25]，其中，麦迪逊等品种CP含量较高，其对应的质量等级也较高。此外，NDF和ADF是反映饲草纤维质量优劣的重要指标，NDF含量增加，会降低牛羊采食量，ADF含量增加，会降低饲草消化率[26]。本研究中，NDF和ADF含量分别为58.18%～61.33%，31.51%～36.28%，根据A型燕麦干草质量分级要求[12]，本试验中一级品种9个，二级品种11个，品质较好。RFQ是评价饲草价值和质量的指标，20个品种中，RFQ较高品种的NDF和ADF含量较低。吴亚等[27]认为RFQ不包含CP、粗灰分等信息，用于评价燕麦干草品质存在一定的局限性，因此，应对燕麦营养品质进行综合评价。本研究中，主成分得分较高的品种为牧丰、甜燕70、刀客等，其干草质量分级也较高，说明可以应用主成分分析法对饲用品质进行综合评价。

3.3　不同燕麦品种的气生根特性和抗倒伏性

倒伏是影响燕麦产量和品质的重要因素[28]，燕麦的倒伏程度与第2茎节节长、有效气生根数等有关。部分学者认为，茎基部强度影响燕麦抗倒伏性，其中，第2茎节是研究燕麦抗倒伏的关键部位，抗倒伏性强的品种第2茎节更短[29]。本研究中，倒伏程度与第2茎节节长显著正相关，进一步说明第2茎节是影响倒伏性的关键部位。降水或浇灌后，土壤松软，如遇大风，燕麦极易倒伏。气生根可辅助燕麦植株保持直立状态，有效气生根数越多，燕麦植株就越牢固，燕麦抗倒伏能力越强。玉米试验证实，气生根数与倒伏性显著负相关，入土气生根条数越多，倒伏率越低，气生根增加有助于提高抗倒伏能力[30]。在本研究中，燕麦有效气生根数多的品种，倒伏程度低，说明气生根可以增强植株固着能力，气生根数量较多的植株抗倒伏性更强[31]，因此，应将气生根情况作为燕麦抗倒伏研究指标，为抗倒伏燕麦品种选育提供理论依据。

表5　主成分特征值和累计方差贡献率

Table 5　Principal component eigenvalues and cumulative variance contribution rate

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	累计贡献率 Cumulative contribution rate (%)
1	3.826	54.66
2	1.745	79.59

表6　主成分在各营养指标上的载荷

Table 6　The loadings of principal components on each nutritional index

项目 Items	主成分 Principal component	
	F_1	F_2
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	0.918	0.354
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	0.874	0.326
粗蛋白 Crude protein	0.422	0.657
粗灰分 Crude ash	0.422	0.688
半纤维素 Hemicellulose	0.334	−0.743
相对饲喂价值 Relative feeding value	−0.883	0.223
相对牧草质量 Relative forage quality	−0.986	0.084

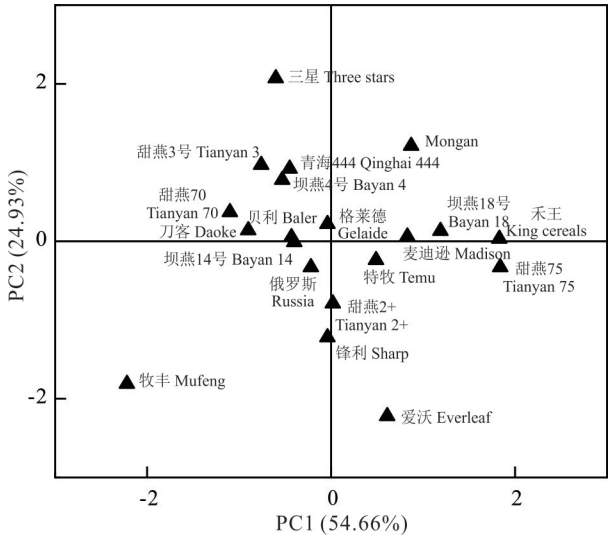


图2　不同燕麦品种的主成分分析

Fig. 2　Principal component analysis of different oat varieties

4　结论

在豫北秋播的20个燕麦品种中，19个品种的越冬率高于95.0%，说明燕麦在河南可正常越冬，生育期为191～208 d，干草产量最高可达15 t·hm^{-2}以上。越冬前分蘖数高的品种产量高，气生根与植株抗倒伏性密切相

表7　不同燕麦品种气生根特性和倒伏程度

Table 7　Aerial roots characteristics and lodging degree of different oat varieties

品种 Variety	第1层气生根 The first layer aerial roots			第2层气生根 The second layer aerial roots			节长 Internode length (mm)		倒伏程度 Lodging degree
	有效 Effective	无效 Ineffective	入土半径 Soil-penetrating radius (mm)	有效 Effective	无效 Ineffective	入土半径 Soil-penetrating radius (mm)	第1节 First internode	第2节 Second internode	
甜燕3号 Tianyan 3	2.70±1.13a	2.05±0.07abcd	6.14±1.51ab	0.05±0.71a	0.25±0.07a	0.05±0.07b	37.2±5.5bcdef	88.5±17.6efg	Ⅱ
贝利 Baler	1.85±0.07ab	2.45±0.78ab	4.89±0.71bcd	0.20±0.28a	0.15±0.21a	0.88±1.24a	38.2±1.0bcdef	94.4±2.2efg	Ⅱ
三星 Three stars	1.63±0.38abc	0.98±0.76cde	0.96±1.37fgh	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00b	40.5±5.3bcdef	99.8±15.2defg	Ⅲ
牧丰 Mufeng	1.60±0.28abc	3.05±0.78a	5.53±0.04abc	0.00±0.00a	0.20±0.14a	0.00±0.00b	33.1±4.0cdef	102.5±1.7cdefg	Ⅲ
麦迪逊 Madison	1.33±1.25bcd	1.97±0.35abcd	4.83±1.22bcd	0.17±0.29a	0.50±0.87a	0.00±0.00b	61.6±5.8a	125.0±4.2abc	Ⅲ
甜燕75 Tianyan 75	1.30±0.57bcd	2.05±0.64abcd	5.85±0.78ab	0.00±0.00a	0.10±0.14a	0.00±0.00b	37.9±7.9bcdef	126.2±3.1abc	Ⅲ
锋利 Sharp	1.25±0.21bcd	2.35±0.07abc	2.63±1.06cdefgh	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00b	42.6±6.2bcde	104.8±10.9bcdefg	Ⅱ
禾王 King cereals	1.17±0.38bcd	1.27±0.67bcde	3.12±1.30bcdefg	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00b	39.3±11.7bcdef	109.7±6.7abcde	Ⅳ
青海444 Qinghai 444	1.10±0.28bcd	1.20±0.57bcde	2.33±0.53defgh	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00b	35.0±3.5bcdef	105.4±3.0abcdefg	Ⅲ
俄罗斯 Russia	1.05±0.21bcd	1.35±0.35bcde	4.69±0.87bcd	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00b	24.0±0.7f	84.5±7.9fg	Ⅲ
格莱德 Gelaide	1.00±0.57bcd	1.95±0.64abcd	4.10±3.20bcde	0.00±0.00a	0.10±0.14a	0.00±0.00b	33.1±2.1cdef	97.7±1.9efg	Ⅳ
特牧 Temu	0.95±0.21bcd	1.15±0.21bcde	8.04±1.43a	0.00±0.00a	0.05±0.07a	0.00±0.00b	29.2±0.3def	112.1±4.6abcde	Ⅳ
坝燕4 Bayan 4	0.85±0.91bcd	0.90±0.99de	2.71±2.14cdefgh	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00b	35.4±3.5bcdef	90.4±5.7efg	Ⅱ
刀客 Daoke	0.75±0.21bcd	2.35±0.07abc	3.85±2.38bcdef	0.10±0.14a	0.05±0.07a	0.00±0.00b	51.5±8.3ab	127.0±0.5ab	Ⅳ
甜燕70 Tianyan 70	0.55±0.35bcd	1.45±0.21bcde	1.24±0.90efgh	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00b	35.6±5.6bcdef	123.2±5.2abcd	Ⅳ
甜燕2＋ Tianyan 2＋	0.40±0.42cd	1.25±0.49bcde	0.34±0.06gh	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00b	43.5±2.6bcd	129.2±8.6a	Ⅳ
爱沃 Everleaf	0.40±0.14cd	2.15±0.35abcd	2.47±0.23defgh	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00b	47.6±8.5abc	106.9±9.1abcde	Ⅳ
坝燕18 Bayan 18	0.35±0.21cd	1.45±1.34bcde	1.15±0.49efgh	0.00±0.00a	0.05±0.07a	0.00±0.00b	26.1±18.6ef	99.2±30.8efg	Ⅲ
坝燕14 Bayan14	0.25±0.07d	0.45±0.35e	1.30±0.42efgh	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00b	35.7±6.3bcdef	82.4±3.8g	Ⅱ
Mongan	0.15±0.15d	0.75±0.49de	0.00±0.00h	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00b	41.6±8.3bcde	95.7±5.6efg	Ⅳ

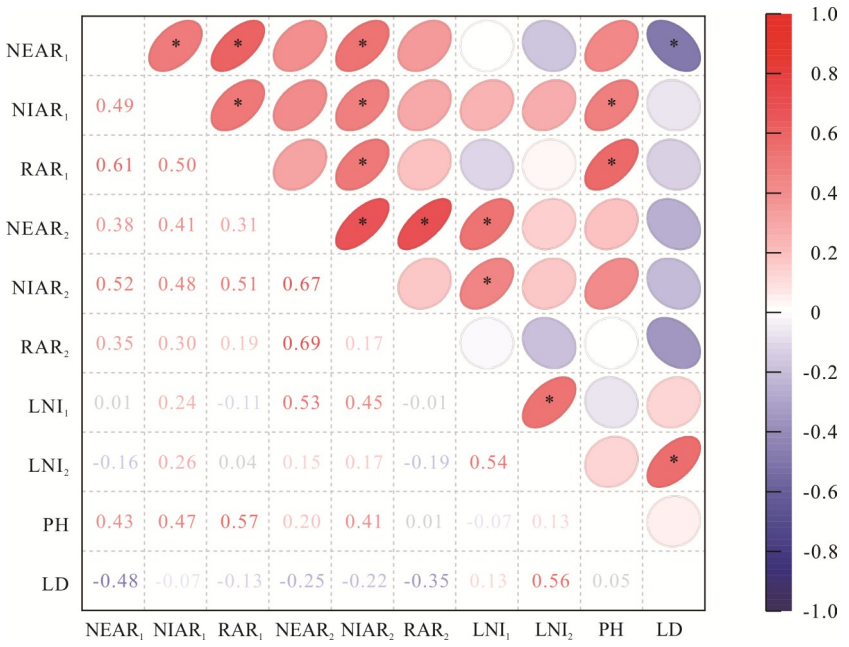


图 3　不同燕麦品种气生根数、节长、株高与倒伏程度之间的关系

Fig. 3　Relationships between aerial roots number, internode length, plant height and lodging degree of different oat varieties

$NEAR_1$：第 1 层有效气生根数 Number of effective aerial roots in the first layer；$NIAR_1$：第 1 层无效气生根数 Number of ineffective aerial roots in the first layer；RAR_1：第 1 层气生根入土半径 Soil-penetrating radius of aerial roots in the first layer；$NEAR_2$：第 2 层有效气生根数 Number of effective aerial roots in the second layer；$NIAR_2$：第 2 层无效气生根数 Number of ineffective aerial roots in the second layer；RAR_2：第 2 层气生根入土半径 Soil-penetrating radius of aerial roots in the second layer；LNI_1：第 1 茎节节长 Length of the first internode；LNI_2：第 2 茎节节长 Length of the second internode；PH：株高 Plant height；LD：倒伏程度 Lodging degree. *表示差异显著（$P<0.05$），下同。* indicates significant difference at 0.05 level, the same below.

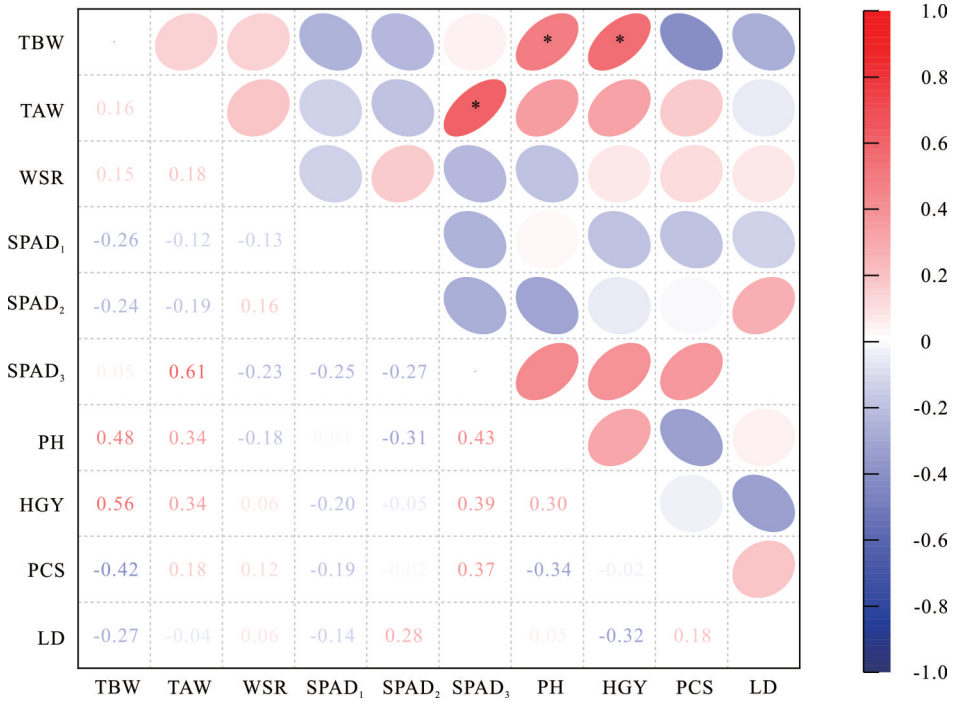


图 4　越冬率、分蘖数、叶绿素值、株高、干草产量和倒伏程度等指标之间的相关性

Fig. 4　Correlations between indicators such as winter survival rate, tiller number, soil and plant analyzer development value, plant height, hay yield, and lodging degree

TBW：越冬前分蘖数 Tiller number before winter；TAW：越冬后分蘖数 Tiller number after winter；WSR：越冬率 Winter survival rate；$SPAD_1$：越冬前叶绿素值 Soil and plant analyzer development value before winter；$SPAD_2$：返青期叶绿素值 Soil and plant analyzer development value at regreening stage；$SPAD_3$：拔节期叶绿素值 Soil and plant analyzer development value at jointing stage；HGY：干草产量 Hay grass yield；PCS：主成分得分 Principal component score.

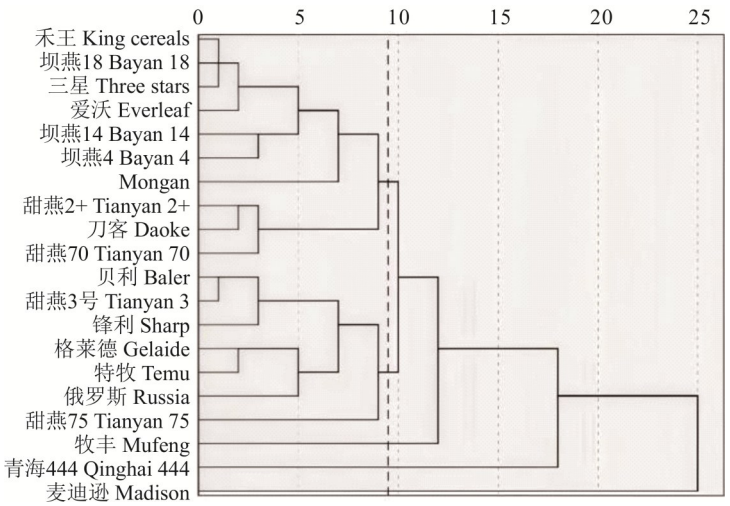


图5 不同燕麦品种的聚类分析

Fig. 5 Cluster analysis of different oat varieties

表8 不同燕麦品种的隶属函数值与综合评价

Table 8 Comprehensive evaluation and membership function values of different oat varieties

品种 Variety	越冬率 Winter survival rate	越冬前分蘖数 Tiller number before winter	株高 Plant height	干草产量 Hay grass yield	主成分得分 Principal component score	第1层有效气生根数 Number of effective aerial roots in the first layer	第2茎节节长 Length of the second internode	倒伏程度 Lodging degree	隶属值 Membership value	隶属值排序 Membership value sorting
甜燕3号 Tianyan 3	0.97	0.71	0.65	0.97	0.45	1.00	0.87	1.00	0.83	1
锋利 Sharp	0.90	0.81	0.68	0.89	0.50	0.43	0.52	1.00	0.72	2
贝利 Baler	0.97	0.52	0.52	0.78	0.46	0.67	0.74	1.00	0.71	3
牧丰 Mufeng	0.83	0.76	0.87	0.28	1.00	0.57	0.57	0.50	0.67	4
坝燕 14 Bayan14	1.00	0.67	0.23	0.42	0.46	0.04	1.00	1.00	0.60	5
麦迪逊 Madison	1.00	0.57	0.74	0.90	0.20	0.46	0.09	0.50	0.56	6
俄罗斯 Russia	0.61	0.24	0.84	0.44	0.45	0.35	0.95	0.50	0.55	7
三星 Three stars	0.93	0.67	0.42	0.22	0.31	0.58	0.63	0.50	0.53	8
格莱德 Gelaide	1.00	0.52	1.00	0.12	0.37	0.33	0.67	0.00	0.50	9
甜燕 75 Tianyan 75	0.90	0.52	0.45	1.00	0.03	0.45	0.06	0.50	0.49	10
甜燕 2+ Tianyan 2+	0.84	1.00	0.65	0.75	0.45	0.10	0.00	0.00	0.47	11
坝燕 4 Bayan 4	0.87	0.19	0.00	0.00	0.42	0.27	0.83	1.00	0.45	12
特牧 Temu	1.00	0.48	0.81	0.36	0.30	0.31	0.36	0.00	0.45	12
刀客 Daoke	0.96	0.43	0.68	0.41	0.55	0.24	0.04	0.00	0.41	13
青海 444 Qinghai 444	0.00	0.33	0.68	0.38	0.39	0.37	0.51	0.50	0.39	14
坝燕 18 Bayan 18	0.96	0.33	0.29	0.08	0.12	0.08	0.64	0.50	0.38	15
甜燕 70 Tianyan 70	1.00	0.33	0.23	0.47	0.57	0.16	0.12	0.00	0.36	16
爱沃 Everleaf	0.83	0.33	0.10	0.39	0.46	0.10	0.47	0.00	0.34	17
禾王 King cereals	0.90	0.24	0.23	0.24	0.00	0.40	0.41	0.00	0.30	18
Mongan	1.00	0.00	0.13	0.12	0.09	0.00	0.71	0.00	0.26	19

关,有效气生根数较多的品种倒伏程度较低。聚类分析与隶属函数法均表明,甜燕3号、锋利和贝利的综合表现(越冬率、干草产量、抗倒伏性与品质)突出,适宜在豫北地区推广种植。

参考文献 References：

[1] Li P F, Mo F, Li D F, *et al*. Exploring agronomic strategies to improve oat productivity and control weeds: leaf type, row spacing, and planting density. Canadian Journal of Plant Science, 2018, 98(5): 1084－1093.

[2] He Z Y. Advantages and application of oat hay in dairy cattle production. China Dairy Cattle, 2015(17): 12－15.
贺忠勇. 燕麦干草在奶牛生产中的优势及应用. 中国奶牛, 2015(17): 12－15.

[3] Yuan B, Chen G Z, Yang H Y, *et al*. Advances in lodging resistance of oats. Journal of Hebei North University (Natural Science Edition), 2024, 40(3): 1－4.
袁搏, 陈冠州, 杨会勇, 等. 燕麦抗倒伏研究进展. 河北北方学院学报(自然科学版), 2024, 40(3): 1－4.

[4] Liang G L, Liu W H, Zhang Y C, *et al*. Effect of lodging on the grain filling process and non-structure carbohydrate of oats. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(4): 1024－1033.
梁国玲, 刘文辉, 张永超, 等. 倒伏发生对燕麦籽粒灌浆进程及非结构性碳水化物的影响. 草地学报, 2020, 28(4): 1024－1033.

[5] Wang Y, Pan Y H, Zhao F L, *et al*. Changes in the lodging resistance of winter wheat from 1950s to the 2020s in Henan Province of China. BMC Plant Biology, 2023, 23(1): 442.

[6] Nan M, Wang X R, Li J, *et al*. Differences in traits related to lodging resistance among oat genotypes. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(11): 106－118.
南铭, 王兴荣, 李晶, 等. 燕麦抗倒伏性状的基因型差异. 草业学报, 2023, 32(11): 106－118.

[7] Tian B H. The methods of lodging resistance assessment in cereal crops and their application in foxtail millet. Journal of Plant Genetic Resources, 2013, 14(2): 265－269.
田伯红. 禾谷类作物抗倒伏性的研究方法与谷子抗倒性评价. 植物遗传资源学报, 2013, 14(2): 265－269.

[8] Yu D W, Zhu M, Yun H Y. Relationship between brace root traits and lodging resistance of maize. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2022, 50(1): 91－97.
于大伟, 朱猛, 员海燕. 玉米气生根性状与抗倒性的关系. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 91－97.

[9] Gao J Y, Feng P J, Zhang J L, *et al*. Enhancing maize's nitrogen-fixing potential through *ZmSBT3*, a gene suppressing mucilage secretion. Journal of Integrative Plant Biology, 2023, 65(12): 2645－2659.

[10] Huang W H, Wang H, Mei D S. Research progress on lodging resistance of crops. Crops, 2018(4): 13－19.
黄文辉, 王会, 梅德圣. 农作物抗倒性研究进展. 作物杂志, 2018(4): 13－19.

[11] Li Z Q. Oat hay quality evaluation. China Dairy Cattle, 2013, 31(19): 1－3.
李志强. 燕麦干草质量评价. 中国奶牛, 2013, 31(19): 1－3.

[12] China Animal Agriculture Association. Oats hay quality grade: T/CAAA 002-2018. Animal Agriculture, 2019(1): 40－43.
中国畜牧业协会. 燕麦干草质量分级: T/CAAA 002-2018. 畜牧产业, 2019(1): 40－43.

[13] Gong M. Screening methods and indexes of drought resistance in crops and comprehensive evaluation. Journal of Yunnan Agricultural University, 1989, 4(1): 73－81.
龚明. 作物抗旱性鉴定方法与指标及其综合评价. 云南农业大学学报, 1989, 4(1): 73－81.

[14] Saika N, Shamshir H, Tawqeer N, *et al*. Bi-environmental evaluation of oat (*Avena sativa* L.) genotypes for yield and nutritional traits under cold stress conditions using multivariate analysis. Plant Genetic Resources: Characterisation & Utilisation, 2024, 22(5): 295－303.

[15] Lou C H, Wang B, Li D F, *et al*. Comparison of production performance and nutritional value of 16 oat varieties in Yellow River beach area. Pratacultural Science, 2019, 36(7): 1843－1851.
娄春华, 王博, 李德锋, 等. 黄河滩区16个春播燕麦品种的生产性能和营养品质. 草业科学, 2019, 36(7): 1843－1851.

[16] Wooten D R, Livingston D P I, Jellen E N, *et al*. An intergenomic reciprocal translocation associated with oat winter hardiness component traits. Crop Science, 2007, 47(5): 1832－1840.

[17] Marshall H G. Breeding oat for resistance to environmental stress. New York, USA: John Wiley & Sons, Ltd, 2015.

[18] Wang G L, Wu B, Zhang J H, *et al*. The comparison of productivity of different oat varieties in the Yellow River Delta. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(6): 141－148.
王国良, 吴波, 张进红, 等. 黄河三角洲地区不同品种燕麦生产性能比较. 中国草地学报, 2020, 42(6): 141－148.

[19] Liang W P, Li S E, He C G, *et al*. Present situation of promotion and utilization status of alfalfa and oat in Qingyang city. China Cattle Science, 2021, 47(4): 82－83, 88.
梁万鹏, 李世恩, 贺春贵, 等. 庆阳市紫花苜蓿和燕麦推广利用现状. 中国牛业科学, 2021, 47(4): 82－83, 88.

[20] Yao J, He Y, Lu J D, *et al*. Winter survival rate, tillering characteristics, and production performance of autumn-sown forage oats in Henan province. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(2): 528-539.
姚晋, 何云, 卢家顶, 等. 河南省秋播饲用燕麦的越冬率、分蘖特性及其生产性能. 草地学报, 2023, 31(2): 528-539.

[21] Sang R J, Danjiuluobu, Zhang H M, *et al*. Comprehensive evaluation of winter survival rate and production performance of 23 forage oat varieties in autumn sowing in northern Henan province. Feed Research, 2025, 48(12): 135-141.
桑瑞娟, 旦久罗布, 张红妹, 等. 23个饲用燕麦品种在豫北秋播的越冬性和生产性能综合评价. 饲料研究, 2025, 48(12): 135-141.

[22] Xu X L, Song Y T, Zhao J D, *et al*. Changes in forage quality and its relationship with plant diversity under fertilization and mowing in Hulun Buir meadow steppe. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(7): 1-10.
徐鑫磊, 宋彦涛, 赵京东, 等. 施肥和刈割对呼伦贝尔草甸草原牧草品质的影响及其与植物多样性的关系. 草业学报, 2021, 30(7): 1-10.

[23] Yang Y X, Wang S Y, He T R, *et al*. Study on plant biomass and its seasonal dynamics of typical wet land ecosystem in the Sanjiang plain. Grassland of China, 2002, 24(1): 2-8.
杨永兴, 王世岩, 何太蓉, 等. 三江平原典型湿地生态系统生物量及其季节动态研究. 中国草地, 2002, 24(1): 2-8.

[24] Yan T F, Wei Z W, Wang A H, *et al*. Evaluation of production performance and feeding value of different oat materials in Jianghuai area. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(3): 111-118.
闫天芳, 魏臻武, 王爱华, 等. 8份燕麦材料在江淮地区生产性能及饲用价值评价. 中国草地学报, 2020, 42(3): 111-118.

[25] Liu Q, Hao H, Tang B, *et al*. Comprehensive evaluation of production performance of 10 oat varieties in Panxi region. Feed Research, 2023, 46(18): 124-128.
柳茜, 郝虎, 唐斌, 等. 10个燕麦品种在攀西地区生产性能综合评价. 饲料研究, 2023, 46(18): 124-128.

[26] Xue H F, Meng Q X. Recent nutritional advances of neutral detergent fiber in dairy cow. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2007, 19(Z1): 454-458.
薛红枫, 孟庆翔. 奶牛中性洗涤纤维营养研究进展. 动物营养学报, 2007, 19(Z1): 454-458.

[27] Wu Y, Zhang W H, Chen M H, *et al*. Productive performance comparison of different oat varieties in Yangzhou region. Pratacultural Science, 2018, 35(7): 1728-1733.
吴亚, 张卫红, 陈鸣晖, 等. 不同品种燕麦在扬州地区的生产性能. 草业科学, 2018, 35(7): 1728-1733.

[28] Marshall H G, Kolb F L, Roth G W. Effects of nitrogen fertilizer rate, seeding rate, and row spacing on semidwarf and conventional height spring oat. Crop Science, 1987, 27(3): 572-575.

[29] Sang R J, Cui C J, He Y, *et al*. Lodging resistance and production performance of 18 autumn-sown forage oat varieties in northen Henan Province. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(8): 74-85.
桑瑞娟, 崔超杰, 何云, 等. 豫北地区18个秋播饲用燕麦品种抗倒伏特性及生产性能评价. 草业学报, 2024, 33(8): 74-85.

[30] Yu D W. Study on the effect of brace root traits on lodging resistance and genetic research of brace root traits. Yangling: Northwest A & F University, 2014.
于大伟. 玉米气生根性状与抗倒性的关系及其遗传研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.

[31] Wang Y X, Zhang Z H, Li Z H. Combining ability and path analysis of lodging resistance traits in maize. Journal of Henan Agricultural University, 2011, 45(1): 1-6.
王永学, 张战辉, 刘宗华. 玉米抗倒伏性状的配合力效应及通径分析. 河南农业大学学报, 2011, 45(1): 1-6.