

DOI: 10.11686/cyxb2025244

http://cyxb.magtech.com.cn

喻嘉玲, 连鹤娜, 杨婉宁, 等. 坪用驱鸟型醉马草种质资源评价与筛选. 草业学报, 2026, 35(6): 73-82.

YU Jia-ling, LIAN He-na, YANG Wan-ning, et al. Evaluation and screening of *Achnatherum inebrians* germplasm lines for use as bird-repellent turfgrass. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(6): 73-82.

坪用驱鸟型醉马草种质资源评价与筛选

喻嘉玲, 连鹤娜, 杨婉宁, 周子童, 陈振江*, 李春杰

(兰州大学草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室, 农业农村部草业创新重点实验室, 草地农业教育部工程研究中心, 甘肃省西部草业技术创新中心, 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020)

摘要:为获得适宜机场草坪建植和驱鸟潜力的醉马草优良种质, 本研究选取从内蒙古、青海、新疆和甘肃不同地点同一生长季收集的22份种质资源, 在榆中试验站进行栽培驯化及形态指标观测和生物碱含量检测。结果表明: 不同醉马草种质资源在株高、分蘖数、有效分蘖数、冠幅以及麦角新碱含量方面均表现出显著差异, 其中, 株高低于80 cm的种质有ZMC₉、ZMC₁₀、ZMC₁₂和ZMC₁₆; 单株分蘖数大于130个的种质有ZMC₁、ZMC₁₇、ZMC₁₈和ZMC₁₉; 单株有效分蘖数大于35个的种质有ZMC₅、ZMC₁₄、ZMC₁₅、ZMC₁₇和ZMC₁₈; 冠幅大于85 cm的种质有ZMC₁₃、ZMC₁₄和ZMC₁₅; 分蘖期生物碱含量超过240 mg·kg⁻¹的种质有ZMC₄、ZMC₁₆、ZMC₁₇和ZMC₂₀; 成熟期仍维持在130 mg·kg⁻¹以上的种质有ZMC₄、ZMC₉和ZMC₂₀。进一步通过灰色关联度和加权关联度排序分析, 初步筛选出植株低矮、分蘖多、冠幅大且麦角新碱含量高, 适宜机场草坪建植和具有驱鸟潜力的ZMC₄、ZMC₉、ZMC₁₇和ZMC₂₀这4份种质资源。为机场坪用驱鸟型醉马草新品种的选育奠定物质基础。

关键词:种质资源; 醉马草; 形态学指标; 麦角新碱; 灰色关联度分析

Evaluation and screening of *Achnatherum inebrians* germplasm lines for use as bird-repellent turfgrass

YU Jia-ling, LIAN He-na, YANG Wan-ning, ZHOU Zi-tong, CHEN Zhen-jiang*, LI Chun-jie

State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Engineering Research Center of Grassland Industry, Ministry of Education, Gansu Tech Innovation Center of Western China Grassland Industry, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

Abstract: The aim of this study was to identify *Achnatherum inebrians* germplasm with bird-repellent potential for airport turf establishment. To this end, 22 accessions collected from Inner Mongolia, Qinghai, Xinjiang, and Gansu during a single growing season were cultivated and acclimatized at the Yuzhong Experimental Station, and their morphological traits and ergonovine content were determined. There were significant differences in plant height, tiller number, effective tiller number, canopy width, and ergonovine content among different *A. inebrians* germplasm lines. Specifically, the germplasm lines ZMC₉, ZMC₁₀, ZMC₁₂, and ZMC₁₆ had plant heights below 80 cm; ZMC₁, ZMC₁₇, ZMC₁₈, and ZMC₁₉ had more than 130 tillers per plant; ZMC₅, ZMC₁₄, ZMC₁₅, ZMC₁₇, and

收稿日期: 2025-06-23; 改回日期: 2025-08-08

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2024M761243), 甘肃省优秀博士研究生项目(22JR5RA434), 甘肃省市场监督管理局知识产权计划(定向组织)项目(22ZSCQD01), 中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2022-kb02, lzujbky-2023-49和lzujbky-2025-jdxx09)和甘肃省林业和草原局草原监测评价技术支撑项目([2021]794号)资助。

作者简介: 喻嘉玲(2002-), 女, 湖北武汉人, 在读硕士。E-mail: yujl2024@lzu.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: chenchenjiang@lzu.edu.cn

ZMC₁₈ produced more than 35 effective tillers per plant; ZMC₁₃, ZMC₁₄, and ZMC₁₅ had canopy widths exceeding 85 cm; ZMC₄, ZMC₁₆, ZMC₁₇, and ZMC₂₀ had alkaloid levels exceeding 240 mg·kg⁻¹ during the tillering stage; and ZMC₄, ZMC₉, and ZMC₂₀ had alkaloid contents exceeding 130 mg·kg⁻¹ at maturity. Grey relational analysis and weighted relational analysis ranking preliminarily screened out four germplasm lines, namely ZMC₄, ZMC₉, ZMC₁₇, and ZMC₂₀, as being suitable for airport turfgrass establishment. These four germplasm lines had low plant height, high tillering capacity, large crown width, and a high ergonovine content, indicative of good bird-repellent potential. These findings provide a foundation for breeding avian-deterrent *A. inebrians* cultivars that are particularly suitable for cultivation in airport environments.

Key words: germplasm resources; *Achnatherum inebrians*; morphological index; ergonovine; grey relational analysis

醉马草(*Achnatherum inebrians*)作为芨芨草属(*Achnatherum*)多年生植物,因其对家畜有毒害作用被列为我国北方草原生态系统的主要毒草之一^[1],主要分布于甘肃、新疆、青海和内蒙古等地区的高山及亚高山草原生态系统。禾草内生真菌(fungal endophyte)是一类在宿主植物体内完成全部或部分生命周期而不引发外部症状的真菌^[2-3]。醉马草常与香柱菌属(*Epichloë*)内生真菌形成共生体,这种互利共生关系显著提升了醉马草的生态适应性。例如,在非生物胁迫方面,增强了宿主醉马草的抗旱性^[4]和抗寒性^[5];在生物胁迫方面,显示出对多种病原菌的抵抗能力^[6-7]。这些特征使其在草原群落演替过程中占据明显优势^[8]。

驱鸟草技术是一种生态防控策略,主要利用植物与内生真菌的共生作用产生生物碱,抑制鸟类及昆虫的消化系统^[9]。在机场生态管理中,该技术可阻止机场环境中昆虫、蛇、啮齿动物、鸟类及天敌食用草坪草,达到驱鸟防治鸟害的目的;且无须施用化学药剂,更加绿色环保^[10]。我国特有的醉马草与*Epichloë*内生真菌形成的稳定共生体系可产生高浓度麦角类生物碱^[11],这些生物碱不仅对家畜具有神经毒性^[12],还能显著抑制无脊椎动物的生长发育^[13],使鸟类取食偏好性降低62%~75%^[14]。作为本土物种,醉马草具有生态适应性强、内生真菌感染率高(近100%)^[2]、生物碱产量高以及多年生等优势,是极具潜力的驱鸟草坪草种。

研究表明,植物在不同地理条件下会表现出明显的表型可塑性^[15]。此前有研究指出,种质来源的差异可显著影响植株的形态特征,如株高、分蘖、生物量积累及次生代谢产物(如生物碱)的合成水平^[16]。为实现醉马草—内生真菌共生体在机场驱鸟草坪中的应用,品种选育需满足双重标准,一是具备高毒性,即高生物碱含量;二是具有植株低矮、分蘖能力强等株型特点^[17]。鉴于此,本研究选取22份醉马草种质资源进行系统评估,采用多指标综合评价法,旨在筛选出兼具理想草坪形态特征(低矮株型、高分蘖能力、大冠幅)和高生物碱(麦角新碱)的优质种质。

1 材料与方法

1.1 试验地概况和试验材料

如表1所示,本研究以采集自4个省不同地区的22份醉马草种质资源为原始材料(图1),参照李春杰等^[18]的禾草内生真菌检测方法对种子和茎秆进行带菌率检测,结果显示均为携带内生真菌植株(endophyte-infected plants, E+)。相关材料在兰州大学榆中金牛山试验站(N 35°52', E 104°06', 海拔1960 m)开展栽培驯化工作。

1.2 试验设计

2019年9月,在榆中金牛山试验站对驯化后的22份E+醉马草材料进行播种,每份种质设4次重复,共88个小区,单个小区面积为2 m²(1 m×2 m),小区间距0.5 m,每个小区种植20株,相关指标于2020年7月进行测量。

1.3 试验方法

1.3.1 形态学指标测定 分蘖期结束测定株高、分蘖数及冠幅,成熟期测定有效分蘖数。每个小区随机选择5株有代表性的植株:株高用软尺从地面量至最高处;分蘖数和有效分蘖数为统计的单株数量;冠幅为测量植株中心不同方向的两次数值取平均值。

1.3.2 生物碱提取与检测 分别采集分蘖期叶片和成熟期整株,在 4 °C 冰箱保存 12 h 后冷冻干燥并研磨粉碎。参考胡春霞^[19]的方法提取生物碱,利用万志文^[20]的方法对麦角新碱含量进行定量检测。

1.3.3 综合评价 应用灰色系统理论,将 22 份醉马草种质群体视为灰色系统,每份种质为独立因素,进行综合评价。

1.4 数据处理与分析

借助 Microsoft Excel 2016 进行数据统计,使用 IBM SPSS Statistics 27.0 软件通过 Duncan 法进行差异显著性分析和聚类分析,使用 Origin 2022 软件完成制图工作。

2 结果与分析

2.1 醉马草种质资源形态学指标的差异分析

2.1.1 株高差异分析 对 22 份醉马草种质的株高进行分析发现,不同种质对株高存在显著影响($P < 0.001$)(图 2)。各种质的株高为 76.59~102.39 cm。其中,ZMC₁₆、ZMC₉、ZMC₁₂和 ZMC₁₀这 4 份种质的株高较低,比其他种质低 15.01%~17.14%。

2.1.2 分蘖数差异分析 不同醉马草种质对分蘖数同样表现出显著影响($P < 0.001$)(图 3)。各种质资源单株分蘖数在 69.4~136.6 个。其中,ZMC₁₇分蘖数最多,单株分蘖数达 136.6 个;ZMC₉、ZMC₁、ZMC₂、ZMC₁₈、ZMC₁₉和 ZMC₂₁这 6 份种质分蘖能力较强,单株分蘖数在 126~133 个,比其他种质多 19.88%~26.08%。

2.1.3 有效分蘖数差异分析 22 份醉马草种质的有效分蘖数存在显著差异($P < 0.05$)(图 4)。各种质单株有效分蘖数在 21.0~39.9 个。研究发现,ZMC₁₄和 ZMC₁₈这两份种质表现较为突出,单株有效分蘖数均为 39.9 个,比其他种质的单株分蘖数高 35.98%;ZMC₁₅、ZMC₁₇、ZMC₂₂、ZMC₃和 ZMC₅这 5 份种质的有效分蘖数相对较多,单株有效分蘖数在 34~37 个之间。

2.1.4 冠幅差异分析 在冠幅方面,22 份醉马草种质存在显著差异($P < 0.05$)(图 5)。各种质的冠幅在 70.82~95.15 cm。ZMC₁₃种质的冠幅最大,达 95.15 cm,比其他种质的冠幅高 22.28%。ZMC₁₅和 ZMC₁₄的冠幅较大,分别为 91.16、87.60 cm。

表 1 22 份醉马草种质来源

Table 1 The 22 germplasm accessions of *A. inebrians*

采集地 Collection site	编号 Code	海拔 Altitude (m)	经度 Longitude	纬度 Latitude
内蒙古 Inner Mongolia	ZMC ₁	1660	105°47′	38°56′
	ZMC ₂	1673	105°43′	38°51′
青海 Qinghai	ZMC ₃	2299	101°21′	35°59′
	ZMC ₄	2874	100°36′	36°18′
	ZMC ₅	3060	100°20′	38°09′
	ZMC ₆	3289	101°03′	35°29′
	ZMC ₇	3547	99°52′	35°47′
新疆 Xinjiang	ZMC ₈	796	87°01′	43°54′
	ZMC ₉	1390	87°04′	43°32′
	ZMC ₁₀	1437	90°37′	43°41′
	ZMC ₁₁	1459	91°13′	43°48′
	ZMC ₁₂	1600	87°20′	43°30′
	ZMC ₁₃	1635	89°37′	43°37′
甘肃 Gansu	ZMC ₁₄	1849	104°02′	35°56′
	ZMC ₁₅	2090	110°48′	38°16′
	ZMC ₁₆	2170	101°22′	38°32′
	ZMC ₁₇	2540	101°31′	38°76′
	ZMC ₁₈	2632	99°30′	38°59′
	ZMC ₁₉	2658	99°34′	38°51′
	ZMC ₂₀	2860	101°35′	38°01′
	ZMC ₂₁	2948	102°33′	35°19′
	ZMC ₂₂	3146	99°92′	38°42′

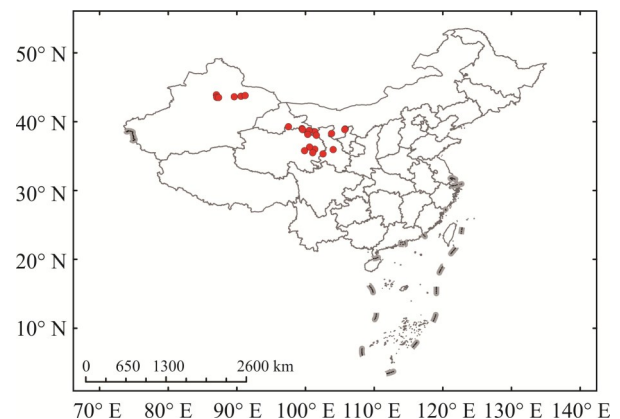


图 1 采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling points

基于自然资源部标准地图服务网站 GS (2024) 0650 号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website GS (2024) 0650 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

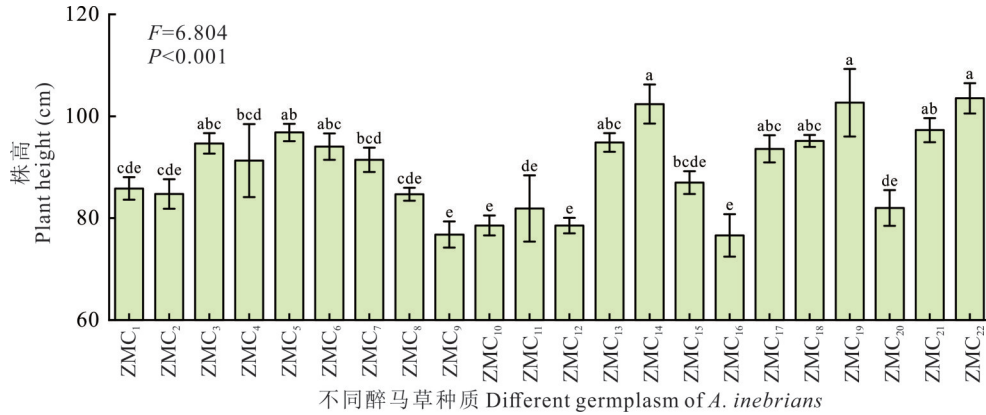


图2 不同醉马草种质株高的差异

Fig. 2 The differences in plant height among different germplasm of *A. inebrians*

不同小写字母表示不同醉马草种质间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different *A. inebrians* germplasm ($P < 0.05$), the same below.

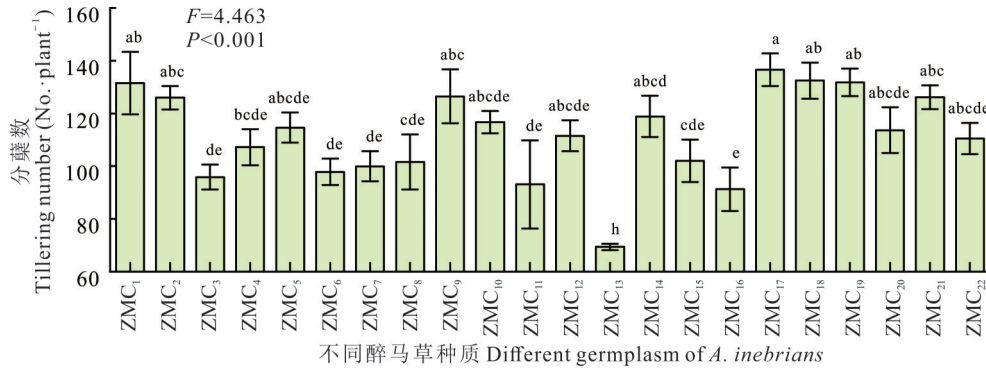


图3 不同醉马草种质分蘖数的差异

Fig. 3 The differences in tiller number among different germplasm of *A. inebrians*

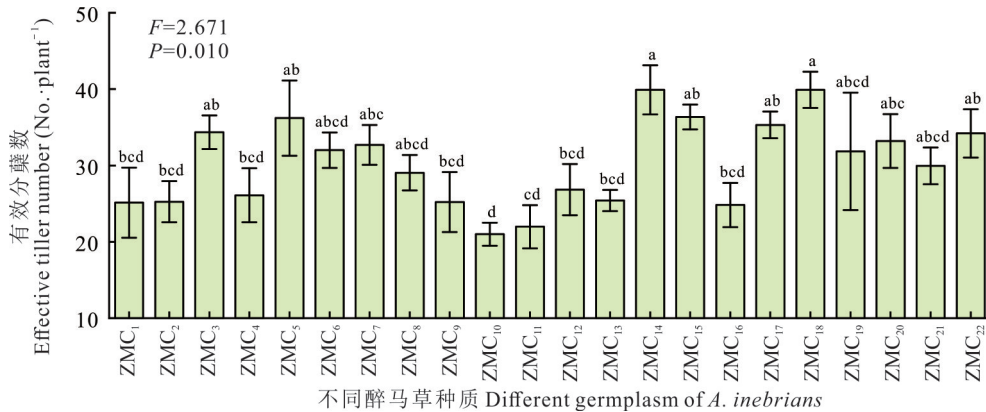


图4 不同醉马草种质有效分蘖数的差异

Fig. 4 The differences in the number of effective tillers among different germplasm of *A. inebrians*

2.2 醉马草种质资源麦角新碱含量的差异分析

2.2.1 分蘖期麦角新碱含量的差异分析 在分蘖期, 22份醉马草种质的麦角新碱含量存在显著差异 ($P < 0.05$) (图6)。各种质在分蘖期的麦角新碱含量在 $4.56 \sim 280.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。ZMC₄的麦角新碱含量最高, 为 $280.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比其他种质的麦角新碱含量高 112.11% ; ZMC₁₆、ZMC₂₀、ZMC₁₇、ZMC₆和 ZMC₉这5份种质的麦角新碱含量相对较高, 为 $196.81 \sim 263.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。而 ZMC₁₀和 ZMC₂种质的麦角新碱含量较低。

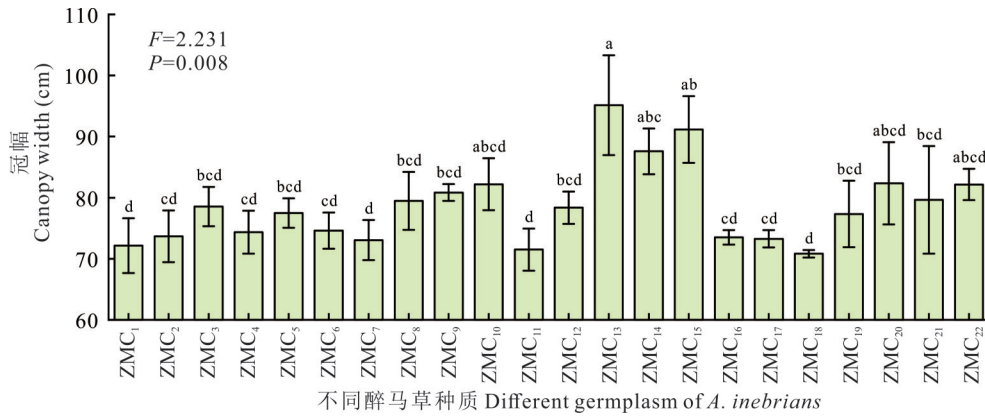


图 5 不同醉马草种质冠幅的差异

Fig. 5 The differences in crown width among different germplasm of *A. inebrians*

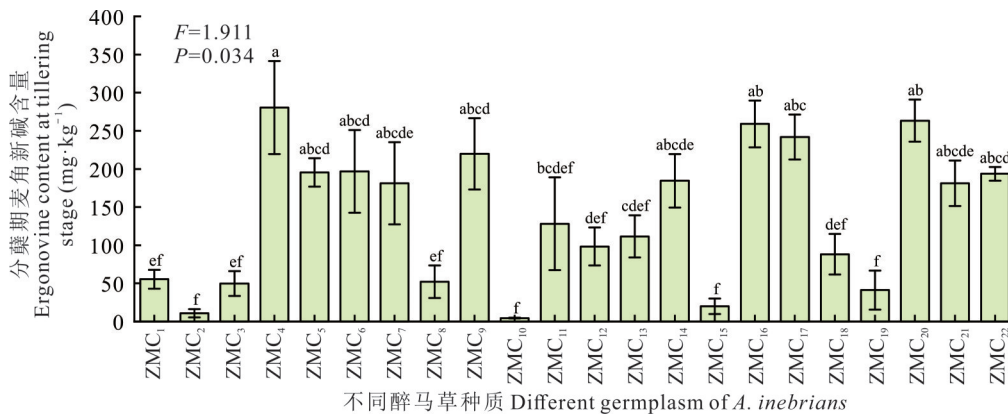


图 6 不同醉马草种质分蘖期麦角新碱含量的差异

Fig. 6 The differences in ergonovine content during the tillering stage among different germplasm of *A. inebrians*

2.2.2 成熟期麦角新碱含量的差异分析 在成熟期, 22 份醉马草种质的麦角新碱含量存在显著差异 ($P < 0.05$) (图 7)。各种质在成熟期的麦角新碱含量在 $4.69 \sim 177.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。ZMC₄ 种质表现出最强的生物碱合成能力, 含量高达 $177.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比其余 21 份种质的麦角新碱含量高 143.88%。ZMC₉、ZMC₂₀、ZMC₂₁ 和 ZMC₂ 这 4 份种质的麦角新碱含量较高, 为 $100.00 \sim 136.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。而 ZMC₁₂ 的麦角新碱含量最低。

2.3 醉马草种质资源的灰色关联度分析和聚类分析

初步分析显示, 等权关联度可反映各性状与理想型的整体相关性 (表 2)。但考虑到不同性状的实际重要性

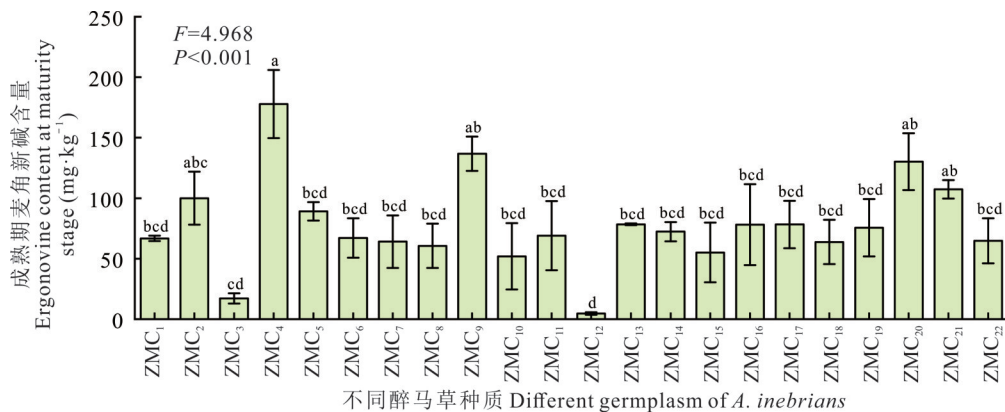


图 7 不同醉马草种质成熟期麦角新碱含量的差异

Fig. 7 The differences in ergonovine content at the maturity stage among different germplasm of *A. inebrians*

存在差异,本研究进一步建立了加权评价体系,各权重系数见表3。依据实际需求,设定醉马草形态学指标与麦角新碱含量的权重各占一半,其中分蘖数、有效分蘖数、株高及冠幅的权重依次为0.25、0.10、0.10和0.05;分蘖期是草坪草生长的重要阶段,与草坪性状联系密切,因此将分蘖期麦角新碱含量设为0.30,成熟期设为0.20。从表2可以看出,不同醉马草种质的等权关联度和加权关联度结果较一致,其中ZMC₄、ZMC₂₀、ZMC₁₇和ZMC₉这4份醉马草的等权关联度和加权关联度均较高,综合表现较好。ZMC₃、ZMC₁₃、ZMC₈和ZMC₁₁醉马草的等权关联度和加权关联度较低,综合表现较差。

表2 不同醉马草种质关联度排序

Table 2 Relational grade ranking of various *A. inebrians* germplasm

不同醉马草 种质 Differ- ent germ- plasm of <i>A. inebrians</i>	等权关联度		加权关联度		不同醉马草 种质 Differ- ent germ- plasm of <i>A. inebrians</i>	等权关联度		加权关联度	
	Unweighted relational grade		Weighted relational grade			Unweighted relational grade		Weighted relational grade	
	关联度值 Relational grade value	排序 Ranking	关联度值 Relational grade value	排序 Ranking		关联度值 Relational grade value	排序 Ranking	关联度值 Relational grade value	排序 Ranking
ZMC ₄	0.7299	1	0.7999	1	ZMC ₁₉	0.5611	16	0.5363	12
ZMC ₂₀	0.7198	2	0.7237	2	ZMC ₂	0.5644	12	0.5284	13
ZMC ₁₇	0.6776	4	0.7081	3	ZMC ₆	0.5515	18	0.5264	14
ZMC ₉	0.7037	3	0.6947	4	ZMC ₇	0.5526	17	0.5208	15
ZMC ₁₆	0.6333	6	0.6289	5	ZMC ₁₀	0.5619	15	0.4924	16
ZMC ₁₄	0.6544	5	0.5992	6	ZMC ₁₂	0.5633	14	0.4993	17
ZMC ₂₁	0.6020	9	0.5961	7	ZMC ₁₅	0.5995	10	0.4901	18
ZMC ₁₈	0.6293	7	0.5893	8	ZMC ₁₁	0.5219	21	0.4768	19
ZMC ₅	0.6070	8	0.5852	9	ZMC ₈	0.5384	20	0.4701	20
ZMC ₂₂	0.5759	11	0.5479	10	ZMC ₁₃	0.5414	19	0.4488	21
ZMC ₁	0.5638	13	0.5406	11	ZMC ₃	0.5154	22	0.4441	22

表3 醉马草各指标的权重系数

Table 3 Weight coefficients of different indices for *A. inebrians*

醉马草指标 <i>A. inebrians</i> indicators	分蘖数 Tiller number	有效分蘖数 Effective tiller number	株高 Plant height	冠幅 Crown width	分蘖期麦角新碱含量 Ergonovine content at tillering stage	成熟期麦角新碱含量 Ergonovine content at maturity stage
权重系数 Weight coefficient	0.25	0.10	0.10	0.05	0.30	0.20

采用欧氏聚类法对22份醉马草种质资源进行聚类分析(图8)。结果表明,在10距离水平上,22份醉马草种质聚类分为2类,第一类有4份材料,分别为ZMC₄、ZMC₂₀、ZMC₉和ZMC₁₇,占比为18.18%,综合表现最佳;第二类有18份材料,分别为ZMC₁₆、ZMC₅、ZMC₁₈、ZMC₂₁、ZMC₁₄、ZMC₁₂、ZMC₁₅、ZMC₁₀、ZMC₈、ZMC₁₁、ZMC₃、ZMC₁₃、ZMC₂₂、ZMC₁₉、ZMC₁、ZMC₇、ZMC₆、ZMC₂,占比为81.82%,综合表现次之。

3 讨论

3.1 醉马草种质资源形态学指标和麦角新碱含量分析

草坪株高是景观评价的关键指标之一,直接影响草坪的使用性能和养护管理成本^[21]。株型过高虽可快速成坪,但会导致修剪频率增加,不仅增加资源消耗,还可能损伤草坪草的光合器官与再生组织。所以在草坪草选育过程中,筛选生长速率适度、矮化特性稳定的优良品种尤为重要。本研究发现,ZMC₁₆、ZMC₉、ZMC₁₂和ZMC₁₀这4

份醉马草种质表现出突出的矮生特性,这种稳定的矮化表型可有效减少草坪修剪次数,降低养护成本,维持草坪的完整性。

分蘖能力是评判草坪质量的关键特征,直接影响草坪密度和覆盖度^[22-23],并与生态功能密切相关^[24]。高分蘖草种经侧芽快速繁殖可形成致密草皮层,这种密集植被不仅能压缩杂草种子的萌发空间,还能通过地上枝叶遮蔽与地下根系竞争来降低杂草的入侵概率^[25]。而单位面积茎叶数量的提升还增强了草坪的抗压强度,使其在践踏胁迫下维持结构稳定性^[26]。分蘖优势还赋予草种卓越的再生能力,在受到外力破坏或恶劣环境影响时能迅速再生,快速恢复景观效果^[27]。本研究筛选出 ZMC₁、ZMC₁₇、ZMC₁₈ 和 ZMC₁₉ 这 4 份醉马草种质,其单株分蘖数较其他种质均值提升幅度为 23.1%~27.9%。有效分蘖是指草坪草

植株在生长发育成熟期能够正常抽穗且结实 10 粒以上的分蘖结构^[28-29]。草坪产业因种子产能不足导致价格居高不下,使优良品种难以实现大规模推广,成为制约产业可持续发展的关键瓶颈。在这 4 份醉马草种质中,ZMC₁₇ 和 ZMC₁₈ 的单株有效分蘖数较高,表明其可为突破产能瓶颈提供核心育种材料。

草坪冠幅作为关键形态指标,直接影响景观美学与功能耐久性^[30]。冠幅较大的品种能够形成紧密的株丛结构^[31],塑造出层次丰富、饱满流畅的绿地景观;并通过增加单位面积的地上生物量积累^[32],更好地分散外界压力,增强草坪的耐践踏性能^[33]。本研究发现筛选出的 ZMC₁₃、ZMC₁₄ 和 ZMC₁₅ 这 3 份种质在冠幅发育方面表现尤为突出,能快速形成致密的草坪覆盖层。

禾草内生真菌共生体产生的生物碱是重要的植物次生代谢产物^[34]。这类化合物能有效提高宿主对多种生物胁迫的抗性^[35],包括昆虫、鸟类、小型哺乳动物及致病微生物的侵害。在机场等特殊场所的植被建设中,因为鸟类等动物会严重影响飞行安全,这种防御特性显得尤为关键。本研究筛选出的 ZMC₄、ZMC₁₆、ZMC₁₇ 和 ZMC₂₀ 这 4 份醉马草种质表现出色,其分蘖期的麦角新碱含量均超过 240 mg·kg⁻¹;其次为 ZMC₉,其含量也超过 200 mg·kg⁻¹;至成熟期含量虽有下降,但 ZMC₄、ZMC₉ 和 ZMC₂₀ 仍保持在 130 mg·kg⁻¹ 以上,这一数值远超出商用品种 Avanex 草坪草(33~53 mg·kg⁻¹)。已有研究表明,采用 Avanex 草种的机场区域,各类昆虫及鸟类数量较对照区域下降近 70%^[36]。由此推断,麦角新碱含量更高的醉马草可能具备更优异的生物驱避与毒杀性能。但目前关于醉马草对野生鸟类毒性的实地研究尚未开展,其在真实环境中的防控效能与潜在生态影响仍需深入探究。

3.2 醉马草种质资源的综合评价

为综合评估不同性状对草坪草应用价值的影响,本研究采用灰色关联度分析及加权关联度排序法进行综合评判。结果表明,在 22 份醉马草种质材料中,ZMC₄、ZMC₉、ZMC₁₇ 和 ZMC₂₀ 这 4 份醉马草种质表现较好。这些优势种质不仅有效分蘖数高,平均每株大于 25 个;而且麦角新碱含量丰富,在分蘖期平均含量超过 240 mg·kg⁻¹,成熟期平均含量超过 130 mg·kg⁻¹;株型也较为优良,平均冠幅大于 75 cm。已有研究证实,生境来源不仅对植物株高、分蘖数及生物量等形态特征存在显著影响,还会导致植物生物碱含量产生明显差异^[16],本研究结果与其相似。此外,本研究中的醉马草种质经渝中金牛山试验站多年栽培驯化后,其形态学指标及生物碱含量已趋于稳定,可为后续应用提供可靠依据。

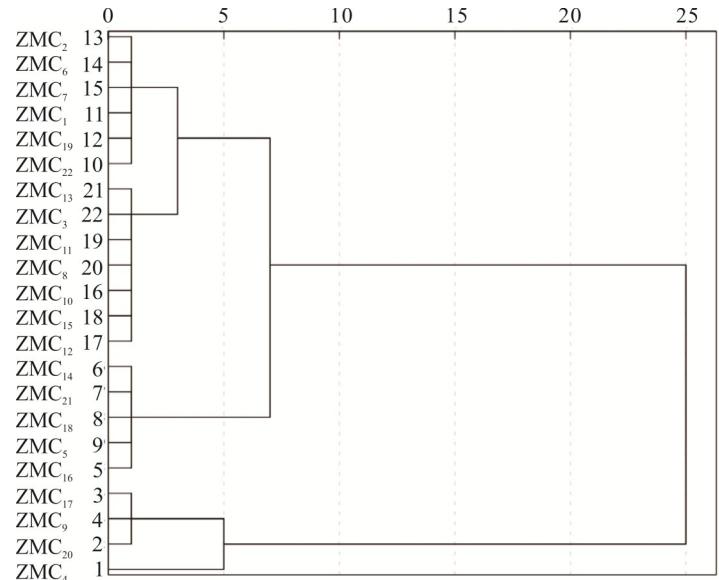


图 8 不同醉马草种质综合表现聚类分析

Fig. 8 Cluster analysis of comprehensive performance of *A. inebrians* from different germplasm

4 结论

研究表明,通过对22份醉马草种质的形态学指标和麦角新碱含量进行综合评估,株高、分蘖数、有效分蘖数、冠幅和分蘖期及成熟期麦角新碱含量等指标可作为机场驱鸟草坪草筛选的关键性状。其中,优势种质为ZMC₄、ZMC₉、ZMC₁₇和ZMC₂₀,这些种质可为醉马草的草坪化利用提供重要的理论依据。

参考文献 References:

- [1] Shi Z C. Important poisonous plants in Chinese grasslands. Beijing: China Agriculture Press, 1997.
史志诚. 中国草地重要有毒植物. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [2] Nan Z B, Li C J. Roles of the grass—*Neotyphodium* association in pastoral agriculture systems. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 605—616.
南志标, 李春杰. 禾草—内生真菌共生体在草地农业系统中的作用. *生态学报*, 2004, 24(3): 605—616.
- [3] Leuchtmann A, Bacon C W, Schardl C L, *et al.* Nomenclatural realignment of *Neotyphodium* species with genus *Epichloë*. *Mycologia*, 2014, 106(2): 202—215.
- [4] Xia C, Christensen M J, Zhang X X, *et al.* Effect of *Epichloë gansuensis* endophyte and transgenerational effects on the water use efficiency, nutrient and biomass accumulation of *Achnatherum inebrians* under soil water deficit. *Plant and Soil*, 2018, 424(1/2): 555—571.
- [5] Chen N, He R L, Chai Q, *et al.* Transcriptomic analyses giving insights into molecular regulation mechanisms involved in cold tolerance by *Epichloë* endophyte in seed germination of *Achnatherum inebrians*. *Plant Growth Regulation*, 2016, 80(3): 367—375.
- [6] Li C J, Gao J H, Ma B. Seven diseases of drunken horse grass (*Achnatherum inebrians*) in China. *Pratacultural Science*, 2003, 20(11): 51—53.
李春杰, 高嘉卉, 马斌. 我国醉马草的几种病害. *草业科学*, 2003, 20(11): 51—53.
- [7] Xia C, Zhang X X, Christensen M J, *et al.* *Epichloë* endophyte affects the ability of powdery mildew (*Blumeria graminis*) to colonise drunken horse grass (*Achnatherum inebrians*). *Fungal Ecology*, 2015, 16(4): 26—33.
- [8] Faeth S H, Helander M L, Saikkonen K T. Asexual *Neotyphodium* endophytes in a native grass reduce competitive abilities. *Ecology Letters*, 2004, 7(4): 301—313.
- [9] Fang F Y, Zhang Y Q. Research and application of airport bird-repellent grass technology. *Air Force Logistics*, 2012(1): 63.
方福勇, 张永强. 机场驱鸟草技术研究和应用. *空军后勤*, 2012(1): 63.
- [10] Ding J Q, Jiang M Q, Peng H Z. Discussion on the application of bird-repellent grass technology at airports. *Science and Technology Innovation Herald*, 2012, 9(35): 240—241.
丁剑桥, 蒋美其, 彭华洲. 驱鸟草技术在机场的应用探讨. *科技创新导报*, 2012, 9(35): 240—241.
- [11] Chen T X. Physiological mechanism of *Epichloë* endophyte infection to enhance salt tolerance of wild barley. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
陈泰祥. 野大麦内生真菌提高宿主耐盐性的生理机制研究. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [12] Hoveland C S. Importance and economic significance of the *Acremonium* endophytes to performance of animals and grass plant. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 1993, 44(1—4): 3—12.
- [13] Potter D A, Stokes J T, Redmond C T, *et al.* Contribution of ergot alkaloids to suppression of a grass-feeding caterpillar assessed with gene knockout endophytes in perennial ryegrass. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2008, 126(2): 138—147.
- [14] Pennell C G L, Popay A J, Rolston M P, *et al.* AvaneX unique endophyte technology: reduced insect food source at airports. *Environmental Entomology*, 2016, 45(1): 101—108.
- [15] Li J L. Research progress on stress physiology and ecology of turfgrass. Nanjing: Nanjing University Press, 2017.
李建龙. 草坪草抗性生理与生态研究进展. 南京: 南京大学出版社, 2017.
- [16] Tian P, Kuang Y, Lin W H, *et al.* Shoot morphology and alkaloid content of *Epichloë* endophyte *Festuca sinensis* associations. *Crop and Pasture Science*, 2018, 69(7): 430—438.
- [17] Sun J X. Turfgrass science. Beijing: China Agriculture Press, 2015.

- 孙吉雄. 草坪学. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- [18] Li C J, Nan Z B, Liu Y, *et al.* Detection methods of endophytes in *Achnatherum inebrians*//Proceedings of the joint annual meeting of Chinese society for plant pathology and mycological society (Hangzhou). Lanzhou: Lanzhou University, 2008: 16–19.
李春杰, 南志标, 刘勇, 等. 醉马草内生真菌检测方法的研究//中国植物病、菌物学会杭州联合年会论文集. 兰州: 兰州大学, 2008: 16–19.
- [19] Hu C X. Effects of N, P and tryptophan on growth and ergot alkaloid content in *Achnatherum inebrians* symbiotic with *Neotyphodium gansuense*. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.
胡春霞. 氮、磷和色氨酸对醉马草内生真菌共生体生长及麦角生物碱含量的影响. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [20] Wan Z W. Effects of temperature, illumination and pH factor on growth and contents of ergot alkaloids of *Epichloë* endophyte symbiotic *Achnatherum inebrians*. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
万志文. 温度、光照和 pH 对醉马草内生真菌共生体生长及麦角生物碱含量的影响. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [21] Hu Y S, Ren T H, Li Z, *et al.* Molecular mapping and genetic analysis of a QTL controlling spike formation rate and tiller number in wheat. *Gene*, 2017, 634: 15–21. DOI: 10.1016/j.gene.2017.08.039.
- [22] Sun L, Zhao S N, Zhang Y, *et al.* Effect of different growth regulators on turf performance of *Eremochloa ophiuroides* L. cv. Wuling. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2022, 269(6): 12–21.
孙林, 赵赛男, 张瑜, 等. 不同生长调节剂对武陵假俭草坪用性能影响的研究. 草学, 2022, 269(6): 12–21.
- [23] Qiu X, Wang J F. The study on weeds population in desolation lawn encounter incidence, and the relationship to density(D), coverage(C) and frequency(F). *Journal of Grassland and Forage Science*, 2005(12): 26–31.
邱翔, 王晋峰. 荒芜草坪杂草种群间相遇几率(PIE)及密度(D)盖度(C)频度(F)的相关性研究. 草学, 2005(12): 26–31.
- [24] Song X. Research progress on stress resistance of seashore paspalum. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2024(11): 126–132.
宋鑫. 海滨雀稗抗逆性研究进展. 现代农业科技, 2024(11): 126–132.
- [25] Sun J X. Turfgrass science. Beijing: China Agriculture Press, 2003.
孙吉雄. 草坪学. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [26] Wu Z J. Causes of grassland degradation and restoration approaches in Urad Middle Banner, Inner Mongolia. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007.
武志杰. 内蒙古乌拉特中旗草原退化原因与修复途径研究. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- [27] Ran F. Regulatory mechanisms and molecular basis of tillering traits formation in *Poa pratensis*. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2024.
冉福. 草地早熟禾分蘖性状形成的调控机理及分子基础. 兰州: 甘肃农业大学, 2024.
- [28] Wu H Y, Qu Z, Liu Z M, *et al.* Comparative study on production performance of oat varieties based on principal component analysis. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(9): 1967–1973.
吴海艳, 曲珍, 刘昭明, 等. 基于主成分分析的燕麦品种生产性能的比较研究. 草地学报, 2021, 29(9): 1967–1973.
- [29] Li H, Chen Y F, Liao Q M, *et al.* Planting and maintenance of turfgrass in the Comores stadium in Africa. *Grassland and Turf*, 2021, 41(3): 78–83.
李辉, 陈雨峰, 廖庆民, 等. 非洲科摩罗体育场草坪建植与养护条件分析. 草原与草坪, 2021, 41(3): 78–83.
- [30] An X K. Evaluation and renovation design of plant landscape beauty in urban wetland park. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
安筱可. 城市湿地公园植物景观美景度评价与优化设计. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [31] Wang X N. Analysis on different gene expression and molecular mechanism for creeping-rooted type *Medicago varia*. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
王晓娜. 根蘖型苜蓿(*Medicago varia*)差异表达基因分析及根蘖性状发生分子机制研究. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [32] Yin D S, Li Y, Zhang J Y. Effects of stumping on the growth and photosynthetic characteristics in *Fraxinus mandshurica* seedlings. *Journal of Beihua University (Natural Science)*, 2025, 26(3): 381–387.
殷东生, 李颖, 张建瑛. 平茬处理对水曲柳苗木生长和光合特性的影响. 北华大学学报(自然科学版), 2025, 26(3):

381—387.

- [33] Zeng S Q, Cheng L, Zhang X R, *et al.* Study on growth and physiological responses of *P. anserina*, *P. reptans* var. *sericophylla* and *P. reptans* to trampling stress. *Grassland and Turf*, 2025, 45(1): 71—79.
曾思琦, 程澜, 张雪茹, 等. 3种委陵菜对践踏胁迫的生长与生理响应. *草原与草坪*, 2025, 45(1): 71—79.
- [34] Fang C, Fernie A R, Luo J. Exploring the diversity of plant metabolism. *Trends in Plant Science*, 2019, 24(1): 83—98.
- [35] Beatriz R, Aldana V, Leinonen P, *et al.* Variation and plasticity in *Epichloë* alkaloid content *Festuca rubra* across Europe. *Fungal Ecology*, 2020, 47: 100942. DOI: 10.1016/j.funeco.2020.100942.
- [36] Pennell C, Rolston P. AVANEX™ endophyte-infected grasses for the aviation industry now a reality//13th Joint Annual Meeting Bird Strike Committee USA/Canada. Lincoln: University of Nebraska-Lincoln, 2011.