DOI:10.11686/cyxb2025408 http://cyxb.magtech.com.cn
彭诗雨, 莫启顺, 刘琼波, 等. 基于灰色关联与DTOPSIS框架的贵州多生态区青贮玉米品种综合评价与筛选. 草业学报, 2026, 35(9): 113－128.
PENG Shi-yu, MO Qi-shun, LIU Qiong-bo, *et al*. Comprehensive evaluation and screening of silage maize varieties in multiple ecological regions of Guizhou Province based on grey relational analysis and a DTOPSIS framework. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(9): 113－128.

基于灰色关联与DTOPSIS框架的贵州多生态区青贮玉米品种综合评价与筛选

彭诗雨[1],莫启顺[2],刘琼波[3],冉艳琳[4],杨丰[5],牛丽丽[1],杨廷韬[6],陈志红[7],何胜江[1],陈超[1],李舟[1*]

(1. 贵州大学动物科学学院,贵州 贵阳 550025;2. 天柱县农业农村局畜牧业发展中心,贵州 黔东南苗族侗族自治州 556600;3. 曲靖市饲草饲料工作站,云南 曲靖 655000;4. 毕节市饲草饲料站,贵州 毕节 551700;5. 贵州省草地技术试验推广站,贵州 贵阳 550025;6. 思南县农业农村局,贵州 铜仁 565100;7. 贵州省大田生态牧业开发有限公司,贵州 黔南布依族苗族自治州 551302)

摘要:为应对贵州省内不同区域的显著气候异质性并解决优质饲草短缺问题,本研究旨在通过多环境测试(METs)和多标准决策(MCDM)模型,构建一个科学的品种评价体系,筛选出适宜于贵州不同生态区的优良品种。研究在贵州东部(思南)、中部(贵定)和西部(大方)3个典型生态区,对21个青贮玉米品种进行了随机区组试验,系统测定了鲜草产量、干物质产量、粗蛋白和相对饲用价值等10项关键指标,采用灰色关联度分析(GRA)探明影响品种表现的关键气象因子,并构建了熵权动态逼近理想解排序(DTOPSIS)模型对各品种在不同生态区的综合表现进行客观排序。研究发现,品种在不同位点的综合排序差异明显。灰色关联度分析表明,与传统温带地区不同,日平均降水量和日平均光合有效辐射是限制贵州青贮玉米干物质产量和粗蛋白含量的关键气象因子,关联系数分别为0.7429、0.6678。基于熵权DTOPSIS模型的综合评价,筛选出了适应不同生态区的最优品种:东部及中部暖湿地区(思南、贵定)表现较优的品种为豫青贮23、大京九4059和曲辰19号。西部相对冷凉地区(大方)则推荐京科青贮932、曲辰512和京九青贮16。本研究首次为贵州复杂山区的青贮玉米提供了基于基因型(G)×环境(E)互作和MCDM模型的区域化布局方案,为"粮改饲"政策的精准实施和区域草食畜牧业发展提供了关键的决策支持与理论依据。

关键词:青贮玉米;品种;产量;营养品质;灰色关联度分析;动态逼近理想解排序

Comprehensive evaluation and screening of silage maize varieties in multiple ecological regions of Guizhou Province based on grey relational analysis and a DTOPSIS framework

PENG Shi-yu[1], MO Qi-shun[2], LIU Qiong-bo[3], RAN Yan-lin[4], YANG Feng[5], NIU Li-li[1], YANG Ting-tao[6], CHEN Zhi-hong[7], HE Sheng-jiang[1], CHEN Chao[1], LI Zhou[1*]

1. *College of Animal Science, Guizhou University, Guiyang* 550025, *China*; 2. *Tianzhu County Agricultural and Rural Affairs Bureau Animal Husbandry Development Center, Qiandongnan Miao and Dong Autonomous Prefecture* 556600, *China*; 3. *Qujing Forage and Feed Work Station, Qujing* 655000, *China*; 4. *Bijie City Forage and Feed Station, Bijie* 551700, *China*; 5. *Guizhou Grassland Technology Experiment and Promotion Station, Guiyang* 550025, *China*; 6. *Sinan County Agricultural and Rural Affairs Bureau, Tongren* 565100, *China*; 7. *Guizhou Datian Ecological Animal Husbandry Development Co., Ltd., Qiannan Buyi and Miao Autonomous Prefecture* 551302, *China*

收稿日期:2025-10-09;改回日期:2025-11-12
基金项目:国家自然科学基金(32160337),贵州省科技支撑项目(黔科合支撑[2023]一般473)和贵州省科协项目(贵州贵定青贮玉米科技小院)资助。
作者简介:彭诗雨(2001－),女,贵州贵阳人,在读硕士。E-mail: z1175507860@qq.com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: zli8@gzu.edu.cn

Abstract: To address the pronounced climatic heterogeneity within Guizhou Province and a scarcity of premium forage, this study aimed to construct a scientific cultivar evaluation framework utilizing multi-environment trials and multi-criteria decision-making (MCDM) models. The objective was to identify cultivars optimally suited for the distinct ecological zones of the region. The investigation involved field trials of 21 silage maize (*Zea mays*) cultivars, conducted across three representative ecological zones of Guizhou-eastern (Sinan), central (Guiding), and western (Dafang)-using a randomized complete block design. Ten critical parameters, encompassing fresh yield, dry matter yield, crude protein, and relative feed value, were systematically assessed. Grey relational analysis (GRA) was employed to elucidate the key meteorological determinants influencing cultivar performance, and an entropy-weighted dynamic technique for order preference by similarity to ideal solution (DTOPSIS) model was constructed for the objective ranking of the overall performance of each cultivar within each ecological zone. The results revealed significant variations in the rankings of cultivars across the different trial sites. The GRA indicated that, in contrast to traditional temperate zones, daily average precipitation and daily average photosynthetically active radiation were the primary limiting meteorological factors constraining the dry matter yield and crude protein content of silage maize in Guizhou, exhibiting high relational degrees (0.7429 and 0.6678, respectively). The multivariate evaluation via the entropy-weighted DTOPSIS model facilitated the identification of cultivars adapted to specific ecological niches. For the warm and humid eastern and central regions (Sinan, Guiding), the better-performing cultivars were identified as Yu silage 23, Dajingjiu 4059, and Quchen No. 19. By contrast, for the cooler western region (Dafang), Jingke silage 932, Quchen 512, and Jingjiu silage 16 were recommended. This study provides a novel, regionalized deployment strategy for silage maize in the complex mountainous terrain of Guizhou, grounded in genotype×environment (G×E) interaction analysis and MCDM modeling. It offers crucial decision-making support and a theoretical foundation for the precise implementation of the national "Grain-to-Fodder" policy and the sustainable development of the regional grass-feeding livestock industry.

Key words: silage maize; variety; yield; nutritional quality; grey relational analysis; dynamic technique for order preference by similarity to ideal solution

青贮玉米(*Zea mays*)因其生物量大、营养价值均衡、适口性好、易于贮藏等特点,是畜牧业发展中的重要饲草作物[1],自2015年我国实施"粮改饲"政策以来,青贮玉米的战略地位日益凸显[2],已成为缓解"草畜矛盾"、保障国家食物安全的重要支撑[3]。饲草作物的产量和品质是复杂的数量性状,由其基因型(genotype,G)、栽培环境(environment,E)及其互作(G×E)共同决定。G×E互作效应可能导致同一品种在不同生态环境下的表现发生显著变化甚至排序翻转[4-5],对饲草作物品种的跨区域布局构成挑战。因此,开展多环境测试(multi-environment trials,METs),是最大限度发挥优良品种遗传潜力、优化农业生产效益的核心前提。

贵州省地处中国西南喀斯特山区,地形地貌复杂,形成了黔东、黔中、黔西等气候特征迥异的多个生态区,为研究G×E互作提供了天然的试验平台。近年来,贵州草食畜牧业的迅猛发展,使得优质饲草供给不足的问题日益突出[6-7]。青贮玉米被视为解决该问题的关键作物,但目前该地区品种的引种与推广多依赖于局部、单一环境的试验结果,缺乏系统性多环境评价,难以精准适配区域生态条件,制约了优良品种潜力发挥与产业效益提升。因此,亟需构建科学、客观的评价体系,以精准识别并推荐适宜于贵州不同生态区的青贮玉米品种。

面对多品种、多性状、多环境的复杂评价,传统的单一指标分析方法已难以胜任。多标准决策(multi-criteria decision-making,MCDM)模型,如基于熵值赋权的动态逼近理想解排序(dynamic technique for order preference by similarity to ideal solution,DTOPSIS)综合评价法,为作物品种的综合筛选提供了强大的分析工具[8-10]。同时,厘清导致品种表现差异的关键环境驱动因子是理解基因型×环境互作内在机理的核心,而灰色关联度分析(grey

relational analysis，GRA）正是识别复杂系统中主导因素并评估其影响的有效方法[11−13]。鉴于此，本研究在贵州东、中、西 3 个典型生态区同步开展了 21 个青贮玉米品种的田间试验，旨在：1）量化评估不同品种在不同生态区的产量及营养品质表现，明确基因型×环境互作的效应；2）利用灰色关联度分析，探明影响品种表现的关键驱动及限制性气象因子；3）构建基于熵权 DTOPSIS 的综合评价模型，客观筛选出适宜于各区域的优良品种组合，为贵州省青贮玉米的科学化、区域化布局提供决策支持与理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

本试验在 2022 年分别于贵州省铜仁市思南县塘头镇（27°44′ N，108°11′ E，海拔 386 m）、黔南布依族苗族自治州贵定县昌明镇（26°25′ N，107°17′ E，海拔 1100 m）和毕节市大方县星宿乡（27°24′ N，105°56′ E，海拔 1760 m）开展，三地均属于亚热带湿润季风气候。不同位点多年气象数据见表 1，2022 年各试验点土壤理化性质及青贮玉米生长季气象数据见表 2 及图 1。

表 1　不同位点多年气象数据

Table 1　Multi-year meteorological data at different sites

地点 Site	区域 Region	年平均气温 Annual average temperature（℃）	年均降水量 Annual average precipitation（mm）	年均日照时数 Annual average sunshine duration（h）
思南 Sinan	黔东部 Eastern Guizhou	17.4	1137	1070.0
贵定 Guiding	黔中部 Central Guizhou	15.5	1084	1073.9
大方 Dafang	黔西部 Western Guizhou	12.3	1089	1203.6

表 2　不同试验点 0~30 cm 土层土壤理化性质

Table 2　Soil physical and chemical properties of 0−30 cm soil layer at different sites

地点 Site	pH	容重 Bulk density（g·cm^{-3}）	有机质 Organic matter（g·kg^{-1}）	全氮 Total nitrogen（g·kg^{-1}）	速效氮 Available nitrogen（mg·kg^{-1}）	速效磷 Available phosphorus（mg·kg^{-1}）	速效钾 Available potassium（mg·kg^{-1}）
思南 Sinan	5.42	1.31	17.94	2.76	128.47	31.27	85.64
贵定 Guiding	5.59	1.25	21.32	2.82	141.05	27.13	91.13
大方 Dafang	5.59	1.33	19.18	1.84	107.59	27.13	63.85

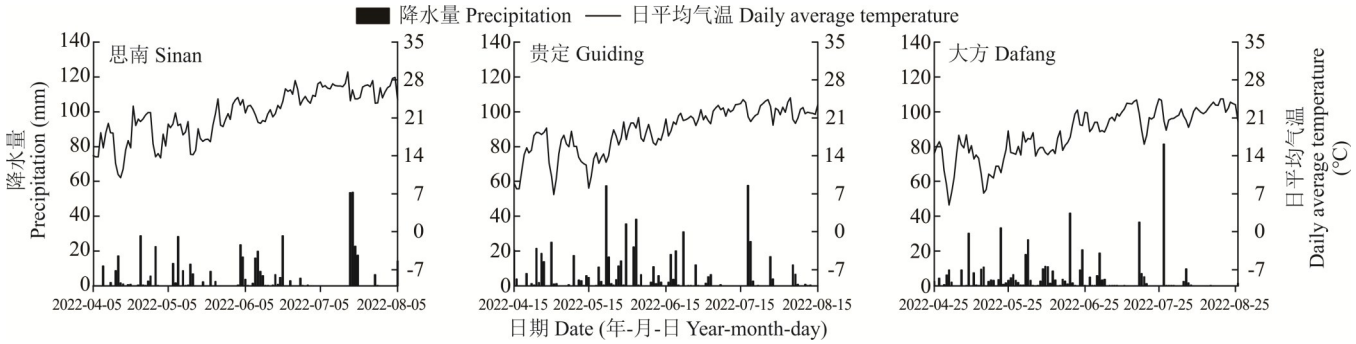


图 1　2022 年青贮玉米生育期日平均气温和降水量

Fig. 1　Daily average temperature and precipitation during the silage maize growth period in 2022

1.2　试验设计

结合文献调研与前期研究，最终确定了在 3 个生态区参试的 21 个供试青贮玉米品种，详见表 3。3 个试验点

统一采用随机区组设计，每个品种设置4个重复，单个试验点共计84个小区，小区的面积为32.4 m^2(6.0 m×5.4 m)，小区间隔1.5 m。播前采用小型旋耕机(宗申1WG-6.3，重庆；威马1WG4.0-100FQ-ZC，重庆；威马1WG6.3-135FC-Z，重庆)对思南、贵定和大方的试验地进行耕作，深度约20 cm，于2022年4月5日、4月15日和4月25日分别在思南、贵定和大方进行播种，密度为81000株·hm^{-2}，行间采用宽窄行设计(80 cm+40 cm)，株距20 cm，穴播种植，播深3～5 cm。基肥在播种前施入，分别为尿素(N≥46%)、过磷酸钙(P_2O_5≥18%)和硫酸钾(K_2O≥52%)，施氮(N)量48.3 kg·hm^{-2}，施磷(P)量81.0 kg·hm^{-2}，施钾(K)量46.8 kg·hm^{-2}，在拔节期和大喇叭口期施用尿素(N≥46%)作为追肥，施肥量分别为62.1和82.8 kg·hm^{-2}。病虫草害防治等田间管理与当地青贮玉米生产保持一致。青贮玉米生育期分别为思南4月5日至8月5日，共122 d；贵定4月15日至8月15日，共122 d；大方4月25日至8月26日，共123 d。

表3 供试青贮玉米品种及来源

Table 3 Silage maize varieties and sources for test

品种 Variety	育种单位 Breeding organization
桂青贮5号 Gui silage No. 5	广西皓凯生物科技有限公司等 Guangxi Haokai Biotechnology Co., Ltd., *et al*
曲辰9号 Quchen No. 9	云南曲辰种业有限公司 Yunnan Quchen Seed Industry Co., Ltd.
曲辰11号 Quchen No. 11	云南曲辰种业有限公司 Yunnan Quchen Seed Industry Co., Ltd.
曲辰19号 Quchen No. 19	云南曲辰种业有限公司 Yunnan Quchen Seed Industry Co., Ltd.
曲辰28号 Quchen No. 28	云南曲辰种业有限公司 Yunnan Quchen Seed Industry Co., Ltd.
曲辰512 Quchen 512	云南曲辰种业有限公司 Yunnan Quchen Seed Industry Co., Ltd.
金玉908 Jinyu 908	贵州省旱粮研究所 Guizhou Drought Grain Sorghum Research Institute
雅玉8号 Yayu No. 8	四川雅玉科技开发有限公司 Sichuan Yayu Technology Development Co., Ltd.
大京九26 Dajingjiu 26	河南省大京九种业有限公司 Henan Dajingjiu Seed Industry Co., Ltd.
大京九青贮3912 Dajingjiu silage 3912	河南省大京九种业有限公司 Henan Dajingjiu Seed Industry Co., Ltd.
大京九4059 Dajingjiu 4059	河南省大京九种业有限公司 Henan Dajingjiu Seed Industry Co., Ltd.
北农青贮208 Beinong silage 208	北京农学院植物科学技术学院 College of Plant Science and Technology, Beijing University of Agriculture
北农青贮368 Beinong silage 368	北京农学院植物科学技术学院 College of Plant Science and Technology, Beijing University of Agriculture
禾玉36 Heyu 36	北京中农三禾农业科技有限公司 Beijing Zhongnong Sanhe Agricultural Technology Co., Ltd.
禾玉9566 Heyu 9566	北京中农三禾农业科技有限公司 Beijing Zhongnong Sanhe Agricultural Technology Co., Ltd.
京九青贮16 Jingjiu silage 16	北京大京九农业开发有限公司 Beijing Dajingjiu Agricultural Development Co., Ltd.
京科青贮932 Jingke silage 932	北京市农林科学院玉米研究中心等 Maize Research Center, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, *et al*
豫青贮23 Yu silage 23	河南省大京九种业有限公司 Henan Dajingjiu Seed Industry Co., Ltd.
迪卡159 Dika 159	中种国际种子有限公司 China Seed International Seed Co., Ltd.
金岭青贮10号 Jinling silage No. 10	内蒙古金岭青贮玉米种业有限公司 Inner Mongolia Jinling Silage Corn Seed Industry Co., Ltd.
金岭青贮97 Jinling silage 97	内蒙古金岭青贮玉米种业有限公司 Inner Mongolia Jinling Silage Corn Seed Industry Co., Ltd.

1.3 测定项目及方法

1.3.1 气象因子测定 青贮玉米生育期内的气象数据，包括生育期日平均温度(daily average temperature, DAT)、日平均降水量(daily average precipitation, DAP)、日平均光合有效辐射(daily average photosynthetically active radiation, DAPAR)均通过各试验点气象站(YGGL-QXZ，北京云谷硅力科技有限公司，北京)获取。生育期有效积温(growing degree days, GDD)采用以下公式计算[11]：

$$GDD=\sum_{t=1}^{N}\left(\frac{T_{max}+T_{min}}{2}-T_{base}\right) \quad (1)$$

式中：t为从播期开始算起的第1天；N为从播种到收获的天数；T_{max}和T_{min}分别为第t天的日最高气温和日最低气温。青贮玉米开始生长基础温度T_{base}=10 ℃，最高温度为T_{top}=35 ℃，当$T_{max}>T_{top}$时，$T_{max}=T_{top}$。

1.3.2　产量测定　在乳熟末期到蜡熟初期之间收获全株青贮玉米，采用小区测产的方式[14]测定青贮玉米鲜草产量，每个小区随机选取 7 株青贮玉米，从根部整株刈割，留茬高度为 5 cm 左右。带回实验室后于烘箱内 105 ℃杀青 30 min，65 ℃下烘干至恒重，确定其干物质产量。

1.3.3　营养品质测定　烘干的青贮玉米粉碎过 1 mm 筛后用于营养品质的测定：粗蛋白（crude protein，CP）含量采用凯氏定氮法测定，参考 GB/T 6432－2018[15]；中性洗涤纤维（neutral detergent fiber，NDF）和酸性洗涤纤维（acid detergent fiber，ADF）含量采用滤袋法和过滤法测定，参考 GB/T 20806－2022[16]和 NY/T 1459－2022[17]；粗脂肪（ether extract，EE）含量采用近红外法测定，参考 GB/T 24902－2010[18]；粗灰分（crude ash，CA）含量采用灼烧法测定，参考 GB/T 6438－2007[19]；淀粉（starch，ST）含量采用旋光法测定，参考 GB/T 20194－2018[20]；水溶性碳水化合物（water soluble carbohydrates，WSC）采用硫酸－蒽酮比色法测定[21]。

相对饲用价值（relative feed value，RFV）的计算公式如下[22]：

$$RFV=\frac{DMI\times DDM}{1.29} \tag{2}$$

$$DMI=\frac{120}{NDF} \tag{3}$$

$$DDM=88.96-0.779\times ADF \tag{4}$$

式中：DMI 是干物质采食量[dry matter intake，%BW（体重 body weight）]，DDM 是可消化干物质含量[digestible dry matter content，%DM（干物质 dry matter）]。

1.4　气象因子与青贮玉米产量及营养品质的灰色关联度分析

确定参考数列和比较数列：将 21 个青贮玉米品种产量、营养品质及各气象因子设为一个整体，即为灰色系统，设产量或营养品质为参考数列 X_0；日平均温度、有效积温、降水量、光合有效辐射分别为比较数列 X_1、X_2、X_3 和 X_4。

数据无量纲化处理：由于原始数据中各气象因子、产量和营养品质的量纲不同，采用均值化方法，即用各数据列的值除以该数据列的平均值。

计算灰色关联系数：根据原始数据标准化处理结果，进一步求出 X_0 与各气象因子 X_i 对应点的绝对差值，即 $\Delta_i(k)=|X_0(k)-X_i(k)|$，求出关联系数 $\varepsilon_i(k)$，计算公式如下[23]：

$$\varepsilon_i(k)=\frac{\min\left[\min\left|x_0(k)-x_i(k)\right|\right]+\rho\times\max\left[\max\left|x_0(k)-x_i(k)\right|\right]}{\left|x_0(k)-x_i(k)\right|+\rho\times\max\left[\max\left|x_0(k)-x_i(k)\right|\right]} \tag{5}$$

式中：$\min[\min|x_0(k)-x_i(k)|]$ 为二级最小差；$\max[\max|x_0(k)-x_i(k)|]$ 为二级最大差；ρ 为分辨系数，此处为 0.5。

1.5　熵值赋权的 DTOPSIS 分析

熵原为热力学概念，现被用来度量信息的不确定性。熵权法通过计算指标的熵值来确定指标的权重。动态逼近理想解排序（DTOPSIS）法通过构造评价问题的正理想解和负理想解，计算各评价对象与正、负理想解的距离，进而得到各评价对象与正理想解的接近程度，以此作为评价优劣的依据。熵值赋权的 DTOPSIS 法是将熵权法确定的客观权重引入到 DTOPSIS 法中，先利用熵权法计算各指标的权重，再将这些权重用于 DTOPSIS 法的加权决策矩阵构造等步骤[24]。

1.5.1　熵值法确定各项指标权重　1）各品种各指标的比重 P_{ij}，即计算各供试品种的指标值占全部品种指标值之和的比重，计算公式如下：

$$P_{ij}=\frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^{N}X_{ij}} \tag{6}$$

式中：N 为品种总数；X_{ij} 为品种的指标值，i 为品种，j 为指标。

2）各项指标的熵权 e_j，计算公式如下：

$$e_j=-\frac{1}{\ln N}\sum_{i=1}^{N}P_{ij}\ln P_{ij} \tag{7}$$

3)各项指标的权重w_j,计算公式如下:

$$w_j=\frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^{N}(1-e_j)} \tag{8}$$

式中:N为指标总数。

1.5.2 DTOPSIS分析 1)对不同位点下21个青贮玉米品种及其指标进行平均值(4次重复)处理,构建比较矩阵,设有m个品种,n个指标,建立评价矩阵A:

$$A=\begin{cases} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ Y_{m1} & Y_{m2} & \cdots & Y_{mn} \end{cases} \tag{9}$$

2)无量纲化处理:将比较矩阵A进行无量纲化处理后得到矩阵B,按照筛选目标,分为正向和负向指标,计算公式如下:

正向指标计算公式:

$$Z_{ij}=\frac{Y_{ij}}{Y_{j\max}} \tag{10}$$

式中:Y_{ij}为矩阵B中第i个品种,第j个指标的原始值;$Y_{j\max}=\max(Y_{ij})$,max为最大值。

负向指标计算公式:

$$Z_{ij}=\frac{Y_{j\min}}{Y_{ij}} \tag{11}$$

式中:$Y_{j\min}=\min(Y_{ij})$,min为最小值。

3)建立决策矩阵R:各指标权重w_j乘以矩阵B中第i个品种第j个指标的无量纲化值得到决策矩阵R。

4)各指标的理想解和负理想解的计算公式如下:

$$X^{+}=\max\left(R_{ij}\right)=\left\{X_1^{+},\ X_2^{+},\ \cdots,\ X_n^{+}\right\} \tag{12}$$

$$X^{-}=\min\left(R_{ij}\right)=\left\{X_1^{-},\ X_2^{-},\ \cdots,\ X_n^{-}\right\} \tag{13}$$

式中:R_{ij}为决策矩阵R中的值,i为品种,j为指标;X_n^{+}为第n个指标的正理想解,X_n^{-}为第n个指标的负理想解。

5)关联度的计算采用欧几里得范数计算各品种各指标与最佳指标的距离S^{+}及与最差指标间的距离S^{-},并计算相对接近度C_i,计算公式如下:

$$S_i^{+}=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(R_{ij}-X_j^{+})^2} \tag{14}$$

$$S_i^{-}=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(R_{ij}-X_j^{-})^2} \tag{15}$$

$$C_i=\frac{S_i^{-}}{S_i^{-}+S_i^{+}} \tag{16}$$

式中:n为指标数;X_j^{+}为第j个指标的正理想解;X_j^{-}为第j个指标的负理想解。

1.6 数据统计与分析

利用Excel 2021对数据进行灰色关联系数和相对接近度的计算,Origin 2021软件作图,使用SPSS 27.0软件进行单因素方差分析(ANOVA),Duncan法进行多重比较($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同位点青贮玉米品种产量和营养品质的比较

为系统比较不同青贮玉米品种在产量与营养品质上的综合表现,本研究对各试验点的鲜草产量、干物质产量、粗蛋白等10个指标进行了方差分析及多重比较、聚类热图分析(表4和图2),以期将表现相似的品种归并为同一类群。

表 4　不同位点各青贮玉米品种产量及营养品质

Table 4　Yield and nutritional quality of silage maize varieties at different sites

位点 Site	品种 Variety	鲜草产量 Fresh yield (kg·hm^{-2})	干物质产量 Dry matter yield (kg·hm^{-2})	粗蛋白 Crude protein (g·kg^{-1})	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (g·kg^{-1})	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (g·kg^{-1})	粗脂肪 Ether extract (g·kg^{-1})	粗灰分 Crude ash (g·kg^{-1})	淀粉 Starch (g·kg^{-1})	水溶性碳水化合物 Water soluble carbohydrates (g·kg^{-1})	相对饲用价值 Relative feed value
思南 Sinan	桂青贮5号	46331.73±4490.63efgC	14375.61±1322.33deC	66.86±0.98fB	453.36±23.33fghiB	259.07±19.38defgB	34.66±2.57defgB	46.50±1.69cdefgB	272.23±4.06fghiB	154.88±9.94ghijB	142.59±10.31defgA
	曲辰9号	38933.66±3312.35ghiC	11525.02±527.55efgC	57.61±1.04hijB	383.68±9.13jklB	201.08±4.79ijkB	30.08±0.77ghijB	41.62±0.99fghiB	243.16±2.96jklB	134.91±2.00klmB	177.94±5.30bcA
	曲辰11号	40454.78±1400.07fghiC	12316.73±55.03efgC	58.70±3.35ghijB	406.13±23.19ijkB	222.19±12.69ghijB	32.26±1.84fghiB	44.00±2.51efghB	252.08±14.40ijkB	136.99±7.82klmB	165.79±10.56bcdA
	曲辰19号	61660.44±4595.44bcB	18397.87±1477.17bcB	80.96±4.61bcdA	557.87±31.78bcA	322.73±18.38abcA	41.91±2.39abA	51.81±2.95abcA	303.29±17.28abcdA	192.02±10.94abcA	107.74±8.35ijkA
	曲辰28号	39750.08±1315.33ghiC	11819.32±255.71efgB	56.65±2.22ijkB	383.75±15.00jklB	205.51±8.03hijkB	30.35±1.19ghijB	41.31±1.62fghiA	242.89±9.50jklA	138.48±5.41jklmB	177.74±8.88bcA
	曲辰512	39025.46±2115.97ghiB	11529.34±472.12efgC	56.15±2.90ijkB	379.27±19.62jklB	205.59±10.63hijkB	29.33±1.52hijB	41.12±2.13ghiB	236.12±12.22klB	132.21±6.84lmB	180.55±11.52bcA
	金玉908	46001.72±4844.80efgC	13800.11±1417.49deB	64.36±2.53fgB	459.20±21.63fghiA	263.10±12.39defgB	35.68±1.52cdefA	45.28±0.74defgA	276.84±0.93efghB	160.18±0.79fghiB	139.75±8.38efghA
	雅玉8号	56685.29±2975.67cdeB	16669.33±504.36cdB	75.68±1.58deA	496.88±11.01defgA	289.32±7.47cdeA	37.85±1.08bcdeA	49.33±2.06abcdeA	287.50±2.50cdefgA	168.60±1.61defghA	124.50±3.86fghijA
	大京九26	53037.52±2650.59cdefB	14905.35±718.93deB	78.29±1.28cdeA	528.03±11.89cdeA	307.28±8.19bcA	40.23±1.14abcA	50.43±1.36abcdA	298.33±7.01abcdeA	179.63±3.82cdeA	114.69±3.60hijkB
	大京九青贮3912	43517.99±1583.31fghB	13882.93±698.62deB	61.21±1.53fghiB	418.26±13.00hijkB	228.77±12.66ghijC	32.27±1.56fghiA	45.70±0.91defgB	265.70±2.49ghiB	146.52±1.23ijklB	158.73±6.95cdeA
	大京九4059	77536.44±4899.69aA	21270.13±1131.27abA	89.71±1.84aA	591.92±18.90abA	333.35±10.65abA	43.97±2.12aA	54.28±1.01aA	320.00±6.30aA	202.38±3.85aA	99.32±4.37jkB
	北农青贮208	44880.08±2174.13efgB	12699.65±755.62efB	85.20±2.02abA	471.16±9.34efghA	280.73±4.54cdefA	36.75±1.18cdefA	47.02±1.90cdefA	274.22±3.04fghiB	163.29±1.78efghiB	132.54±3.36fghiA
	北农青贮368	59226.19±4181.19cdA	16916.65±1152.61cdB	80.89±1.95bcdA	551.72±11.89bcdA	315.82±6.88abcA	41.89±1.01abA	51.64±1.36abcA	308.28±3.49abcdA	185.43±3.09bcdA	108.62±3.23ijkB
	禾玉36	47796.35±3634.51defgB	14838.53±1038.29deB	73.20±1.63eA	482.68±12.34efgA	287.44±7.35cdeA	36.69±0.90cdefA	47.83±1.11bcdeA	285.63±6.71defgA	171.50±3.82defgA	128.52±4.43fghiB
	禾玉9566	31413.15±2664.90hiB	9495.29±822.31fgB	50.59±1.21kA	342.52±17.98lB	185.80±15.32jkA	26.68±2.55jAB	36.74±0.29iA	224.69±4.59lA	125.42±2.75mB	204.48±14.97aA
	京九青贮16	48062.09±2283.02defgB	14856.35±515.77deB	63.77±2.02fghB	437.63±16.43ghijB	247.61±9.29efghB	34.16±1.61efghB	44.10±1.20efghB	262.81±3.78hijB	151.75±2.27hijkB	148.79±7.32defA
	京科青贮932	52847.03±6377.77cdefB	14783.99±1870.37deB	77.12±2.17cdeB	507.41±16.95cdefB	299.22±9.99bcdB	39.38±1.15abcdA	49.17±1.99abcdeB	294.87±3.21bcdefB	177.01±12.28cdefB	120.78±5.33ghijkA
	豫青贮23	71967.15±6626.24abA	22012.29±2078.64aA	83.22±2.59abcA	413.68±10.76hijkAB	243.54±11.53fghiA	43.99±1.06aA	52.97±3.59abA	309.62±5.30abcA	196.49±4.53abA	157.71±5.97cdeB
	迪卡159	74239.40±4676.89aA	21023.01±1374.54abA	83.74±1.55abcA	615.01±45.58aA	355.05±37.38aA	44.32±1.48aA	53.62±1.76abA	317.50±5.28abA	205.00±3.31aA	95.57±13.25kB
	金岭青贮10号	38344.59±3826.70ghiC	11649.89±1148.68efgB	53.64±1.42jkB	362.12±6.39klB	190.79±3.37jkB	27.67±0.53ijB	39.16±1.59hiB	240.08±3.93klB	126.48±2.28mB	190.41±4.04abA
	金岭青贮97	29700.47±3079.03iC	9058.10±1111.97gB	52.80±0.71jkB	340.78±12.39lB	175.37±6.38kB	25.69±1.01jB	37.84±0.86iB	228.64±3.81lB	121.41±2.31mB	206.34±8.82aA

续表 Continued Table

位点 Site	品种 Variety	鲜草产量 Fresh yield (kg·hm^{-2})	干物质产量 Dry matter yield (kg·hm^{-2})	粗蛋白 Crude protein (g·kg^{-1})	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (g·kg^{-1})	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (g·kg^{-1})	粗脂肪 Ether extract (g·kg^{-1})	粗灰分 Crude ash (g·kg^{-1})	淀粉 Starch (g·kg^{-1})	水溶性碳水化合物 Water soluble carbohydrates (g·kg^{-1})	相对饲用价值 Relative feed value
贵定 Guiding	桂青贮5号	67790.25±1930.48cB	23787.00±898.87bcA	94.46±0.81bcA	544.05±25.21abcdeA	307.11±21.10bcdefgAB	41.82±2.21abcdAB	58.30±0.89bcdA	350.22±4.22dA	245.10±13.66bA	112.21±8.01efB
	曲辰9号	87882.30±4005.68bA	30726.00±735.80aA	91.91±1.59cA	535.98±12.02abcdeA	323.98±7.27abcdeA	38.42±0.69cdeA	60.91±1.09abcA	326.57±3.14fA	194.32±2.00deA	110.73±3.57efB
	曲辰11号	62889.75±1369.93cdeB	21829.50±886.87bcdeA	92.27±2.86cA	528.18±6.85bcdefA	319.26±4.14abcdefA	41.00±0.20bcdA	56.80±0.47dA	325.83±3.50fA	194.91±2.02deA	112.85±2.08efB
	曲辰19号	100950.30±4205.01aA	33885.00±1445.19aA	91.27±2.49cA	511.41±10.62cdefA	286.34±12.82efgA	35.69±1.80efgB	52.79±2.13eA	308.11±1.88gA	182.77±1.44efA	121.39±4.21defA
	曲辰28号	61419.60±1411.51cdefA	23598.00±417.12bcdA	63.64±1.90gA	508.79±19.06cdefA	262.64±20.48ghA	35.46±0.71efgA	38.79±0.99iA	253.65±2.19iA	151.67±1.49gA	125.98±7.56defB
	曲辰512	88535.70±5755.24bA	31603.50±2211.41aA	103.12±1.59aA	598.32±12.51aA	361.66±7.56aA	43.95±0.97abA	61.49±0.73abA	382.30±3.29bA	226.27±2.40cA	94.60±2.94fB
	金玉908	95233.05±4855.83abA	34020.00±1461.00aA	81.48±2.44deA	502.69±16.13defA	303.86±9.75cdefgA	38.17±1.62defA	46.10±0.65ghA	300.79±0.87gA	178.81±0.46fA	121.20±5.12defA
	雅玉8号	63543.15±3335.70cdeAB	22450.50±679.26bcdA	80.32±1.01deA	497.10±8.59defA	295.58±7.33defgA	35.89±0.69efgA	49.96±1.30efA	290.90±1.25hA	173.90±0.80fA	123.44±3.24defA
	大京九26	71220.60±6112.00cA	24583.50±1871.05bA	77.56±0.45efA	479.75±5.05efghB	276.71±4.65efgB	33.86±0.96ghB	38.82±0.73iB	248.04±2.13ijB	147.35±1.31ghB	130.64±1.96cdefA
	大京九青贮3912	60439.50±4288.78cdefA	22315.50±1438.09bcdA	84.99±1.37dA	480.65±13.96efghA	270.09±14.26gB	35.60±1.27efgA	49.30±0.79efgA	303.01±2.01gA	180.71±1.15efA	131.84±5.84cdefB
	大京九4059	66810.15±4237.67cdA	23665.50±1771.11bcdA	58.38±0.76hB	398.49±11.49iB	190.16±5.48ijB	22.32±0.71jB	34.03±0.56jB	249.76±1.84ijB	147.28±1.09ghB	173.46±5.90bA
	北农青贮208	59622.75±3532.54cdefA	22018.50±1403.20bcdeA	77.51±1.36efB	489.74±8.98defgA	283.33±4.01efgA	34.34±0.32fghA	46.50±1.46fghA	304.21±2.32gA	180.14±1.63efA	127.10±2.97defA
	北农青贮368	70240.50±4247.10cA	24637.50±1548.27bA	78.21±1.34efA	461.43±6.49fghiB	274.36±4.82fgB	33.00±0.30ghB	47.97±0.81fghB	307.98±2.26gA	181.00±2.15efA	136.24±2.63cdeA
	禾玉36	86902.20±3983.42bA	30226.50±1459.73aA	60.14±1.13ghB	428.26±10.39ghiB	204.37±4.96ijB	24.21±0.52jB	36.97±0.45ijB	242.10±3.54jB	143.83±2.25ghB	158.87±4.75bcdA
	禾玉9566	61419.60±6418.64cdefA	21708.00±1879.94bcdeA	50.87±1.13iA	428.37±23.53ghiA	222.32±21.46hiA	28.08±2.69iA	30.50±0.20kB	241.89±3.78jA	142.82±2.67ghA	157.42±12.06bcdB
	京九青贮16	53991.90±2564.74defB	19750.50±685.67cdeA	99.10±2.45abA	597.22±17.24aA	361.00±10.42aA	45.19±1.05aA	56.67±1.14dA	395.03±3.09aA	234.13±2.27bcA	95.02±4.07fB
	京科青贮932	57989.25±3822.76cdefB	21181.50±1318.38bcdeA	101.01±2.37aA	584.17±14.57abA	353.11±8.81abA	43.93±1.05abA	59.51±1.70abcdA	323.71±2.86fA	262.01±14.04aA	98.03±3.55efB
	豫青贮23	61092.90±2565.51cdefA	22572.00±1087.85bcdA	74.73±1.06fB	303.68±61.62jB	172.09±34.92jB	35.24±0.85efgB	45.08±2.40hA	252.26±1.66iB	150.21±1.05ghB	257.81±43.79aA
	迪卡159	53578.80±1749.19defB	19629.00±455.28cdeA	48.38±0.29iB	416.91±36.65hiB	218.67±28.89iB	31.23±1.04hiB	29.56±0.57kB	228.73±2.84kB	136.31±1.55hB	165.47±19.43bcA
	金岭青贮10号	48351.60±3558.88fB	17658.00±1186.57eA	94.40±1.94bcA	571.71±7.90abcA	345.58±4.77abcA	42.32±0.72abA	57.43±1.79cdA	340.62±2.94eA	201.71±2.43dA	100.93±1.95efB
	金岭青贮97	51945.30±3888.51efB	19197.00±1489.57deA	99.44±0.74aA	557.84±19.43abcdA	337.19±11.74abcdA	41.99±1.17abcA	62.53±0.77aA	373.83±5.40cA	221.51±3.81cA	104.99±5.18efB

续表 Continued Table

位点 Site	品种 Variety	鲜草产量 Fresh yield (kg·hm^{-2})	干物质产量 Dry matter yield (kg·hm^{-2})	粗蛋白 Crude protein (g·kg^{-1})	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (g·kg^{-1})	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (g·kg^{-1})	粗脂肪 Ether extract (g·kg^{-1})	粗灰分 Crude ash (g·kg^{-1})	淀粉 Starch (g·kg^{-1})	水溶性碳水化合物 Water soluble carbohydrates (g·kg^{-1})	相对饲用价值 Relative feed value
大方 Dafang	桂青贮5号	78021.64±1598.59aA	17939.85±753.96abB	97.30±4.09abA	602.99±25.34abA	364.48±15.32abA	43.64±2.62abA	56.85±2.07abcA	347.88±10.37bcA	239.65±30.75aA	94.09±5.95jkB
	曲辰9号	71364.64±956.28bcB	16398.56±552.93cdB	88.94±3.00cdA	551.18±18.59bcdA	333.17±11.23cdA	38.26±1.76cA	60.19±1.43abA	324.71±7.91cdA	192.73±5.73cdA	106.74±4.94hijB
	曲辰11号	69189.38±927.14cdA	15898.73±536.09cdB	86.23±2.91cdA	534.38±18.02cdeA	323.02±10.89cdA	40.65±1.44bcA	56.20±0.91bcA	324.05±8.37cdA	193.93±4.76cdA	111.47±5.10hiB
	曲辰19号	69178.95±884.76cdB	15883.31±373.94cdB	86.15±2.03cdA	533.86±12.57cdeA	322.70±7.60cdA	38.53±1.01cAB	51.89±2.42cdA	307.11±4.55deA	181.80±3.81deA	111.36±3.67hiA
	曲辰28号	48563.21±621.12gB	11150.03±262.49hB	60.48±1.42hAB	474.71±11.18fghA	226.54±5.33hAB	25.36±0.88fC	38.21±1.25gA	252.19±5.79fA	151.00±3.46efgA	139.92±4.13deB
	曲辰512	80910.00±1034.79aA	18576.75±437.34aB	100.76±2.37aA	624.39±14.70aA	377.42±8.89aA	45.32±1.19aA	60.98±0.98abA	377.98±12.95aA	224.05±7.48abcA	88.87±3.14kB
	金玉908	61743.41±827.35eB	14187.75±478.41efgB	76.95±2.60efgA	476.87±16.08fghA	288.25±9.72efgAB	33.90±1.29deA	45.81±0.75efA	300.40±2.01deA	178.22±1.76defA	130.19±5.71efgA
	雅玉8号	65759.18±881.16dA	15110.48±509.53defB	81.96±2.76defA	507.89±17.13defA	307.00±10.35defA	36.44±1.38cdA	48.74±2.04deA	289.21±5.04eA	172.78±3.30defgA	119.57±5.37ghiA
	大京九26	57727.58±773.55fB	13264.95±447.27gB	71.95±2.43gB	475.58±16.04fghB	269.51±9.09gB	31.37±1.20eB	38.25±1.03gB	243.92±11.45fB	145.18±6.17efgB	133.40±5.73efgA
	大京九青贮3912	66591.19±851.65dA	15289.16±359.92cdeB	82.93±1.95cdeA	513.89±12.10cdefA	310.63±7.31cdeA	36.72±1.36cdA	48.87±0.97deA	301.48±5.64deA	179.94±3.03defA	117.39±3.81ghiB
	大京九4059	43702.28±887.47hB	10036.20±308.72hiB	54.43±1.68hiB	427.29±13.14hiB	203.91±6.27hiB	22.95±0.95fgB	33.81±0.63ghB	246.29±9.70fB	145.31±5.53efgB	159.52±6.13cA
	北农青贮208	61329.45±784.38eA	14081.10±331.49efgB	76.37±1.80efgB	504.84±11.88defA	286.09±6.74efgA	33.68±1.17deA	45.63±1.84efA	302.33±6.71deA	179.31±3.90defA	123.02±3.88fghA
	北农青贮368	59735.48±800.45efA	13726.35±462.81fgB	74.45±2.51fgA	461.36±15.56fghB	278.88±9.40fgB	32.69±1.25deB	47.24±1.24defB	305.95±6.93deA	179.39±5.98defA	136.04±5.91defA
	禾玉36	45931.01±615.48ghB	10554.30±355.85hiC	57.25±1.93hiB	449.35±15.15ghAB	214.43±7.23hiB	25.18±0.54fB	36.41±0.85gB	238.73±11.22fB	142.11±6.32fgB	150.07±6.06cdA
	禾玉9566	39751.46±286.11iB	9132.15±265.63ijB	49.53±1.44ijA	388.80±11.31ijAB	185.54±5.40ijA	20.24±0.72ghB	30.40±0.24hiB	239.49±9.78fA	141.60±6.21fgA	178.65±6.02bAB
	京九青贮16	77785.84±2940.00aA	17896.65±1006.90abA	97.07±5.46abA	601.53±33.84abA	363.61±20.46abA	43.44±2.18abA	55.89±1.52bcA	391.39±11.25aA	232.09±6.95abA	95.00±7.83jkB
	京科青贮932	80204.93±1876.46aA	18421.16±628.15aAB	99.91±3.41aA	619.16±21.11aA	374.26±12.76aA	43.98±2.27abA	58.24±2.36abA	322.14±7.02cdA	253.79±35.21aA	90.23±4.56kB
	豫青贮23	59259.23±757.90efA	13605.79±320.30fgB	73.80±1.74fgB	487.80±11.48efgA	276.43±6.51fgA	32.39±0.38deC	43.74±2.96fA	249.22±8.53fB	147.70±6.82efgB	128.75±4.02efgB
	迪卡159	36055.88±461.12jC	8278.31±194.87jB	44.90±1.06jB	352.45±8.29jB	168.19±3.96jB	18.75±0.52hC	28.97±0.95iB	226.81±7.55fB	135.12±4.37gB	200.45±5.55aA
	金岭青贮10号	72974.25±933.31bA	16754.74±394.46bcA	90.88±2.14bcA	563.15±13.26bcA	340.41±8.01bcA	40.89±1.07abcA	56.32±2.29bcA	337.00±11.05cA	199.66±7.19bcdA	103.29±3.48ijkB
	金岭青贮97	78225.00±1048.22aA	17974.99±606.10abA	97.49±3.29abA	604.17±20.37abA	365.20±12.31abA	43.70±1.64abA	61.63±1.39aA	371.50±12.37abA	220.16±8.37abcA	93.53±4.51jkB

续表 Continued Table

位点 Site	品种 Variety	鲜草产量 Fresh yield (kg·hm^{-2})	干物质产量 Dry matter yield (kg·hm^{-2})	粗蛋白 Crude protein (g·kg^{-1})	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (g·kg^{-1})	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (g·kg^{-1})	粗脂肪 Ether extract (g·kg^{-1})	粗灰分 Crude ash (g·kg^{-1})	淀粉 Starch (g·kg^{-1})	水溶性碳水化合物 Water soluble carbohydrates (g·kg^{-1})	相对饲用价值 Relative feed value
位点 Site		***	***	***	***	***	**	***	***	***	***
品种 Variety		***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
位点×品种 Site×variety		***	***	***	***	***	***	***	***	***	***

桂青贮5号：Gui silage No. 5；曲辰9号：Quchen No. 9；曲辰11号：Quchen No. 11；曲辰19号：Quchen No. 19；曲辰28号：Quchen No. 28；曲辰512：Quchen 512；金玉908：Jinyu 908；雅玉8号：Yayu No. 8；大京九26：Dajingjiu 26；大京九青贮3912：Dajingjiu silage 3912；大京九4059：Dajingjiu 4059；北农青贮208：Beinong silage 208；北农青贮368：Beinong silage 368；禾玉36：Heyu 36；禾玉9566：Heyu 9566；京九青贮16：Jingjiu silage 16；京科青贮932：Jingke silage 932；豫青贮23：Yu silage 23；迪卡159：Dika 159；金岭青贮10号：Jinling silage No. 10；金岭青贮97：Jinling silage 97. 同列不同大写字母表示相同青贮玉米品种不同位点处理间差异显著($P<0.05$)，同列不同小写字母表示相同位点不同青贮玉米品种间差异显著($P<0.05$)。Different uppercase letters within the same column indicate significant differences among different sites of the same silage maize at the 0.05 level, and different lowercase letters within the same column indicate significant differences among different silage maize of the same site at the 0.05 level. ***: $P<0.001$; **: $P<0.01$.

在思南试验点，可将21个青贮玉米品种划为3类(图2)，第Ⅰ类(豫青贮23)表现为高产量，高粗蛋白、低中性洗涤纤维与酸性洗涤纤维，较高相对饲用价值；第Ⅱ类(迪卡159等9个品种)各指标表现较好，但中性洗涤纤维与酸性洗涤纤维含量较高；第Ⅲ类(金岭青贮97等11个品种)产量较低，粗蛋白、中性洗涤纤维及酸性洗涤纤维含量低，但相对饲用价值高。鲜草产量最高的是大京九4059(77536.44 kg·hm^{-2})，干物质产量最高的是豫青贮23(22012.29 kg·hm^{-2})，而金岭青贮97的鲜草产量和干物质产量最低(29700.47 kg·hm^{-2}、9058.10 kg·hm^{-2})。粗蛋白含量为大京九4059最高(89.71 g·kg^{-1})，禾玉9566最低(50.59 g·kg^{-1})；相对饲用价值为金岭青贮97最高(206.34)，迪卡159最低(95.57)。

在贵定试验点，可将21个青贮玉米品种划为3类，第Ⅰ类(豫青贮23)，干物质产量较低，中性洗涤纤维与酸性洗涤纤维含量低，但相对饲用价值显著高于其他类群；第Ⅱ类(禾玉36等10个品种)产量、营养品质及相对饲用价值表现中等；第Ⅲ类(曲辰512等10个品种)产量较高，粗蛋白、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量高，但相对饲用价值低。鲜草产量最高的是曲辰19号(100950.30 kg·hm^{-2})，干物质产量最高的是金玉908(34020.00 kg·hm^{-2})，而金岭青贮10号的鲜草产量和干物质产量最低(48351.60 kg·hm^{-2}、17658.00 kg·hm^{-2})。粗蛋白含量为曲辰512最高(103.12 g·kg^{-1})，迪卡159最低(48.38 g·kg^{-1})；相对饲用价值在豫青贮23最高(257.81)，曲辰512最低(94.60)。

大方试验点21个青贮玉米品种也可划分为3类，第Ⅰ类(迪卡159等7个品种)产量低，中性洗涤纤维及酸性洗涤纤维含量低，但相对饲用价值表现良好；第Ⅱ类(北农青贮368等9个品种)产量、中性洗涤纤维与酸性洗涤纤维含量中等，但相对饲用价值较低；第Ⅲ类(京九青贮16等5个品种)产量、粗蛋白、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量高，但相对饲用价值低。曲辰512的鲜草产量及干物质产量最高(80910.00 kg·hm^{-2}、18576.75 kg·hm^{-2})，而迪卡159的鲜草产量和干物质产量最低(36055.88 kg·hm^{-2}、8278.31 kg·hm^{-2})。粗蛋白含量为曲辰512最高(100.76 g·kg^{-1})，迪卡159最低(44.90 g·kg^{-1})；相对饲用价值为迪卡159最高(200.45)，曲辰512最低(88.87)。

2.2 青贮玉米产量及营养品质与气象因子的灰色关联度分析

灰色关联度分析结果表明，青贮玉米产量及营养品质受气象因子影响的程度各异(表5)，在产量方面，鲜草产量受日平均光合有效辐射的影响最大(关联度系数为0.6852)；干物质产量与日平均降水量密切相关(关联度系数达0.7429)。营养品质方面，粗蛋白、酸性洗涤纤维和粗灰分主要受日平均光合有效辐射的影响(关联度系数为0.6678、0.6428、0.6765)；中性洗涤纤维、粗脂肪及水溶性碳水化合物含量与日平均降水量关联度最高(关联度系数为0.7002、0.6659和0.6620)；此外，淀粉含量和相对饲用价值则主要受日平均温度影响(关联度系数为0.6598和0.7504)。

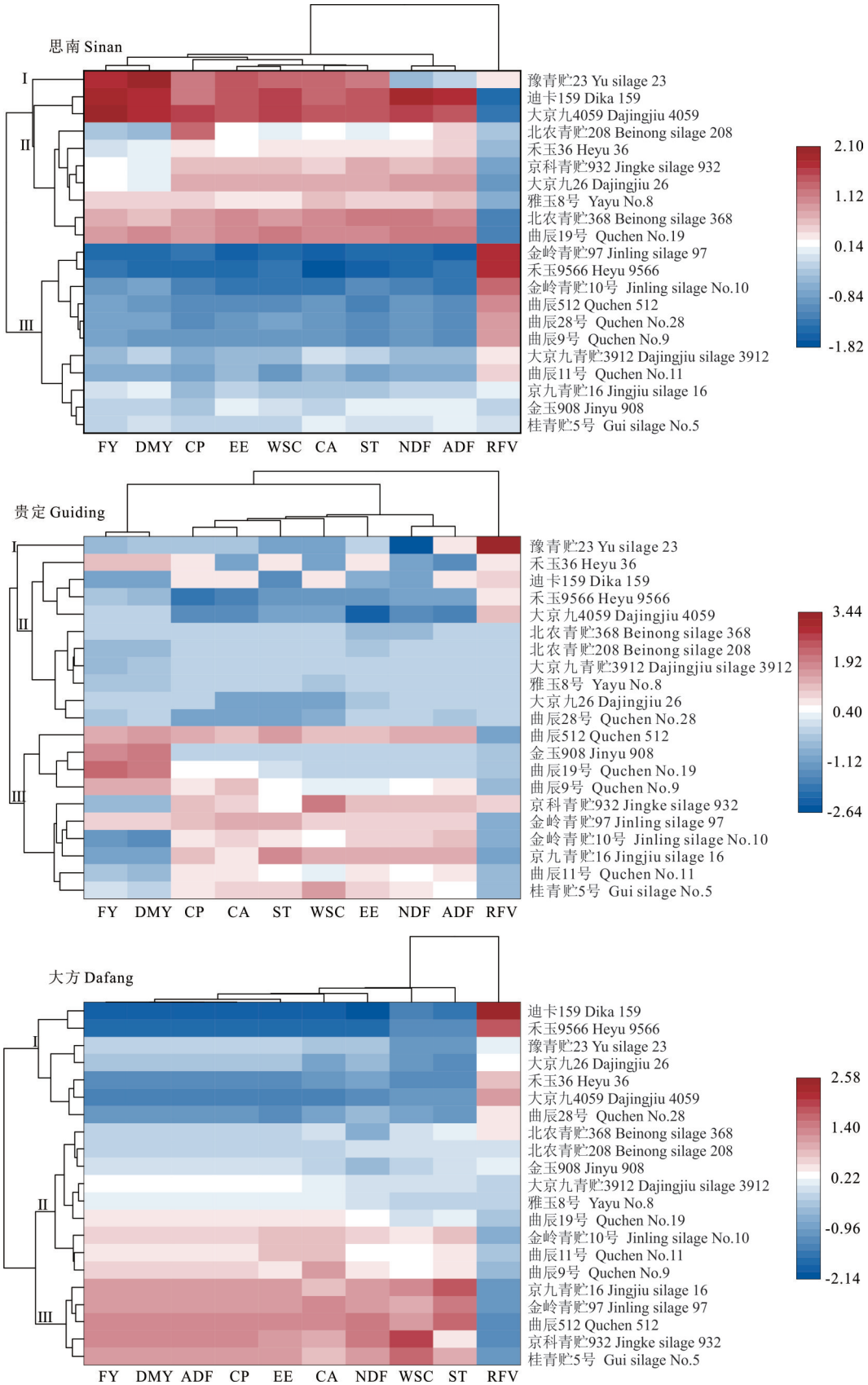


图 2　不同位点各青贮玉米品种及指标的聚类分析

Fig. 2　Cluster analysis of silage maize varieties and indexes at different sites

FY：鲜草产量 Fresh yield；DMY：干物质产量 Dry matter yield；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；EE：粗脂肪 Ether extract；CA：粗灰分 Crude ash；ST：淀粉 Starch；WSC：水溶性碳水化合物 Water soluble carbohydrates；RFV：相对饲用价值 Relative feed value.

表5 各气象因子与青贮玉米产量及营养品质的灰色关联度系数

Table 5 Grey relational coefficients of meteorological factors with silage maize yield and nutritional quality

项目 Item	有效积温 Growing degree days	日平均温度 Daily average temperature	日平均降水量 Daily average precipitation	日平均光合有效辐射 Daily average photosynthetically active radiation
鲜草产量 Fresh yield	0.6021	0.6326	0.6338	0.6852
干物质产量 Dry matter yield	0.6244	0.6675	0.7429	0.7250
粗蛋白 Crude protein	0.5742	0.5711	0.6398	0.6678
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	0.6134	0.6188	0.7002	0.6821
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	0.5778	0.6021	0.6361	0.6428
粗脂肪 Ether extract	0.6136	0.6103	0.6659	0.6515
粗灰分 Crude ash	0.5401	0.5789	0.6562	0.6765
淀粉 Starch	0.5739	0.6598	0.6275	0.6341
水溶性碳水化合物 Water soluble carbohydrates	0.5865	0.6318	0.6620	0.6572
相对饲用价值 Relative feed value	0.7465	0.7504	0.6755	0.6428

2.3 不同位点青贮玉米产量和营养品质的综合评价

在思南试验点，青贮玉米各指标权重排前4的是鲜草产量、干物质产量、相对饲用价值和酸性洗涤纤维含量，权重值分别为0.1875、0.1628、0.1442和0.1156，权重值加和为0.6101，表明这4个指标在思南试验点的综合评价中影响较大。在贵定试验点，相对饲用价值、粗灰分含量、鲜草产量、粗蛋白含量的权重值分别为0.1704、0.1199、0.1129和0.1098，权重值加和为0.5130，表明这4个指标在贵定试验点的综合评价中影响较大。在大方试验点，权重值排名较高的是粗脂肪含量、相对饲用价值、干物质产量、粗蛋白含量、酸性洗涤纤维含量，权重值加和为0.5877，表明这5个指标在大方试验点综合评价中的重要性较高，对最终评价结果的影响更大(表6)。

表6 不同位点青贮玉米产量和营养品质的熵值及权重

Table 6 Entropy and weight of silage maize yield and nutritional quality at different sites

地点 Site	指标 Index	鲜草产量 Fresh yield	干物质产量 Dry matter yield	粗蛋白 Crude protein	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	粗脂肪 Ether extract	粗灰分 Crude ash	淀粉 Starch	水溶性碳水化合物 Water soluble carbohydrates	相对饲用价值 Relative feed value
思南 Sinan	熵值 Entropy (e_j)	0.9891	0.9905	0.9949	0.9951	0.9933	0.9956	0.9979	0.9981	0.9957	0.9916
	权重 Weight (w_j)	0.1875	0.1628	0.0882	0.0837	0.1156	0.0756	0.0354	0.0331	0.0740	0.1442
贵定 Guiding	熵值 Entropy (e_j)	0.9928	0.9941	0.9930	0.9964	0.9935	0.9951	0.9924	0.9958	0.9940	0.9891
	权重 Weight (w_j)	0.1129	0.0931	0.1098	0.0560	0.1013	0.0768	0.1199	0.0656	0.0941	0.1704
大方 Dafang	熵值 Entropy (e_j)	0.9922	0.9922	0.9922	0.9966	0.9922	0.9907	0.9924	0.9958	0.9942	0.9916
	权重 Weight (w_j)	0.1113	0.1115	0.1115	0.0491	0.1115	0.1332	0.1083	0.0605	0.0830	0.1200

按照相对接近度对不同青贮玉米品种的产量及营养品质进行排序，在思南试验点C_i值排名前5的青贮玉米品种是豫青贮23、大京九4059、迪卡159、曲辰19号和北农青贮368，C_i值分别为0.7522、0.6121、0.5876、0.5231和0.4883，C_i值排名后3位的是金玉908、曲辰11号、北农青贮208，其C_i值分别为0.3701、0.3673和0.3535；贵定试验点C_i值排名前5的青贮玉米品种是豫青贮23、禾玉36、大京九4059、曲辰19号和金玉908，C_i值分别为0.5951、0.4553、0.4485、0.4419和0.4270，金岭青贮10号、北农青贮208和雅玉8号的C_i值排名为后3位，分别为0.3043、0.3021、0.2984；在大方试验点C_i值排前5名的青贮玉米品种为京科青贮932、曲辰512、京九青贮16、桂

青贮 5 号和金岭青贮 97，C_i值分别为 0.5562、0.5560、0.5554、0.5535 和 0.5459，C_i值后 3 名的青贮玉米品种则包括大京九 4059、禾玉 36 和曲辰 28 号，其 C_i值分别为 0.3855、0.3717 及 0.3592（图 3）。综上，品种大京九 4059 在思南、贵定排名靠前，在大方排名靠后，表明其适应性可能受当地气候条件限制。

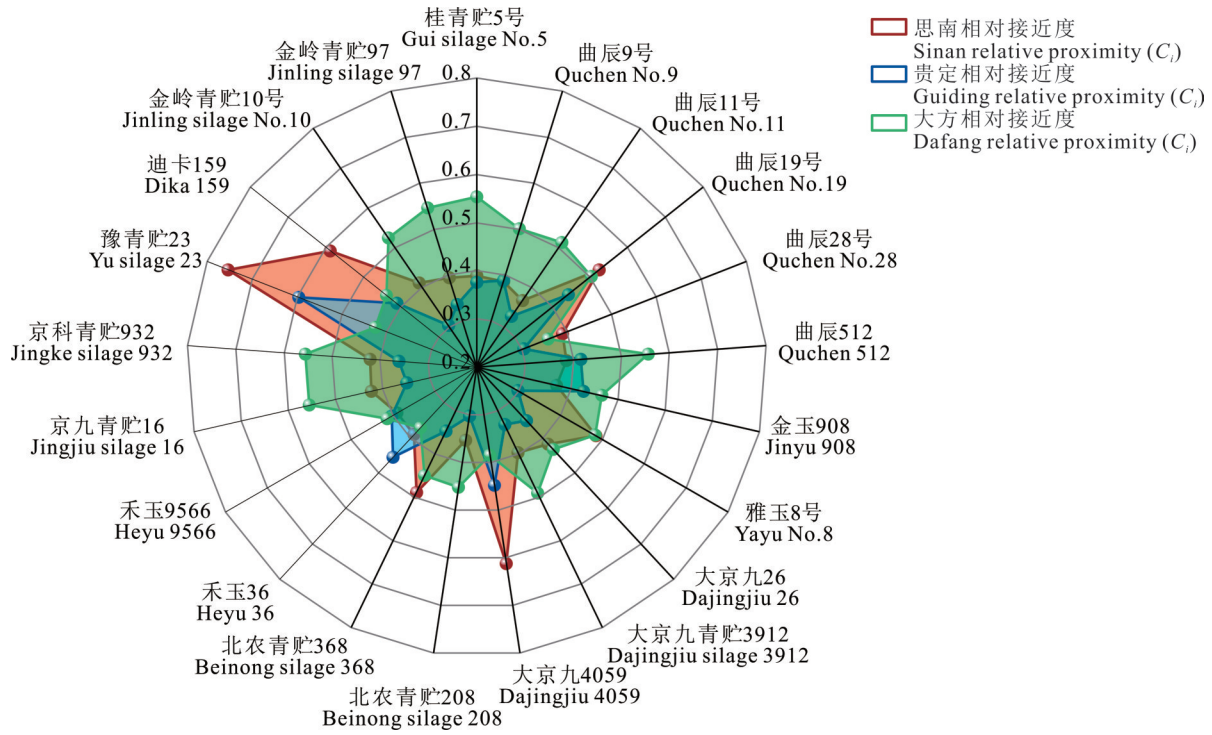


图 3　不同位点下各青贮玉米品种动态逼近理想解排序法的相对接近度

Fig. 3　Relative proximity (C_i) of silage maize varieties across different sites based on dynamic technique for order preference by similarity to ideal solution (DTOPSIS)

3　讨论

3.1　基因型与环境互作效应揭示了品种的区域特异性

同一品种的产量表现受到基因型与环境互作的显著影响[25]。豫青贮 23 在思南和贵定位点综合表现优异，但在大方位点的 C_i值排名却非常靠后，而曲辰 512 等品种则表现出对大方环境的特异性适应。品种排序的显著变化揭示了任何单一优异品种都难以普适于所有环境，实施品种区域化布局是必要的科学策略。思南位点（黔东）海拔最低，生育期平均温度最高，但其平均产量却为三地最低。这可能归因于持续的高温胁迫，一方面高温加剧了植株的呼吸作用，增加了能量消耗，降低了净干物质的积累效率[26−27]；另一方面高温加速了生育进程，缩短了灌浆期，最终限制了产量潜力的发挥[28]。这一机制解释了在贵州中、西部地区高产的曲辰 512 等品种在思南的干物质产量较贵定、大方分别减少了 63.52% 和 37.94%。

3.2　光、水因子是影响贵州青贮玉米生产力的关键限制因子

灰色关联度分析揭示，在贵州这一亚热带湿润季风气候区，日平均降水量和光合有效辐射是影响青贮玉米产量与品质的主导气象因子，其重要性高于传统上被视为核心驱动力的温度和有效积温。这一结论迥异于温带地区普遍适用的作物生长模型，凸显了区域生态农学研究的必要性。贵州常年的多云寡照可能使光资源成为光合生产的首要限制因素[29−30]。本研究中，光合有效辐射与鲜草产量、粗蛋白及粗灰分含量等关键指标的关联度较高，印证了光能利用效率是决定生物量积累和品质形成的核心环节[31−32]。此外，季风气候带来的降水时空分布不均，使得阶段性干旱或洪涝成为常态[33]。适宜的降水不仅直接满足作物生长需求，还通过影响土壤养分有效性间接调控作物的营养品质[34]，这体现在降水与干物质产量、粗脂肪等指标的高度关联性。此外，日平均温度对淀粉

含量和相对饲用价值(RFV)的影响较大,尤其是在高温的思南位点淀粉含量普遍偏低,这与高温胁迫会增强淀粉分解酶活性、抑制合成酶活性的生理机制相符[35-36]。因此,本研究的发现为该区域未来的青贮玉米育种与品种选择指明了方向:选育耐阴、耐湿且对高温不敏感的品种,较单纯追求耐热性更具现实意义。

3.3 熵权DTOPSIS模型在品种综合评价中的客观性与优越性

本研究采用熵权DTOPSIS模型处理多维度评价数据,其基于数据自身信息熵确定指标权重,有效避免了主观赋权偏差,体现出良好的客观决策能力。不同位点的指标权重体系存在差异:思南以产量指标权重最高,贵定以RFV权重最高,而大方则呈现产量与品质并重的格局。这一结果客观体现了不同生态条件下品种性状表达的主导方向各异,也从侧面印证了G×E互作的复杂性。本研究的评价结果与张正洁等[37]和王靖等[38]在其他作物上的应用效果一致,证明了该方法在多目标作物优选中的普适性和可靠性。

4 结论

1)贵州思南、贵定及大方地区的21个不同青贮玉米品种在产量与品质上存在显著的基因型与环境互作效应,且日平均降水量与日平均光合有效辐射是限制青贮玉米生产力的关键气象因子。

2)基于熵权DTOPSIS模型的综合评价,为贵州青贮玉米的区域化提出品种布局方案:东部及中部暖湿地区宜优先种植豫青贮23、大京九4059和曲辰19号;西部相对冷凉地区则推荐适应性更强的京科青贮932、曲辰512和京九青贮16。

参考文献 References:

[1] Wang X Y. Research on the application of forage maize and the progress in its cultivation measures. Feed Industry, 2024, 45(13): 139-144.
王新友. 青贮玉米应用现状以及其栽培措施研究进展. 饲料工业, 2024, 45(13): 139-144.

[2] Wang Y, Chen M. Study on the influence of "changing grain to forage" policy on livestock and poultry breeding scale. Feed Research, 2024, 47(8): 191-194.
王玉, 陈明. "粮改饲"政策实施对畜禽养殖规模影响的研究. 饲料研究, 2024, 47(8): 191-194.

[3] Fan Y H, Yue S Y, Nan Z B, *et al*. The evolution of China's maize seed industry, relevant industrial policies and implications for grassland agriculture development. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(3): 189-203.
樊有鹤, 岳思妤, 南志标, 等. 我国玉米种业与产业政策演进及其对草地农业发展的启示. 草业学报, 2025, 34(3): 189-203.

[4] Wang L Q, Yu X F, Gao J L, *et al*. Patterns of influence of meteorological elements on maize grain weight and nutritional quality. Agronomy, 2023, 13(2): 424.

[5] Guo J, Weng Q Y, Lin H, *et al*. Study on growth characters and adaptability of silage maize in different latitudes. Feed Research, 2022, 45(6): 118-122.
郭江, 瓮巧云, 林红, 等. 不同纬度地区青贮玉米生长性状、适应性研究. 饲料研究, 2022, 45(6): 118-122.

[6] Peng M Y, Wang D H, He H, *et al*. Current situation, problems and countermeasures of Guizhou local cattle breeding industry. China Cattle Science, 2019, 45(4): 55-58.
彭梦阳, 王大会, 贺花, 等. 贵州地方黄牛种业现状、存在问题及对策. 中国牛业科学, 2019, 45(4): 55-58.

[7] Wang J T, Sa D W, Shao L H, *et al*. Optimizing agricultural structure and accelerating the development of the forage industry. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(2): 211-220.
王加亭, 撒多文, 邵麟惠, 等. 调整优化农业结构, 加快饲草产业发展. 草业学报, 2025, 34(2): 211-220.

[8] Wu Y, Li W, Ma D Z, *et al*. Comprehensive evaluation of different maize varieties by DTOPSIS method based on entropy weight. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(4): 32-41.
吴玥, 李威, 马德志, 等. 基于熵值赋权的DTOPSIS法对不同玉米品种综合评价研究. 玉米科学, 2019, 27(4): 32-41.

[9] Liu L J, Liu Y G, Jin G X. Comprehensive evaluation of rice varieties by DTOPSIS method based on entropy weight. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(7): 39-45.
刘丽娟, 刘延刚, 金桂秀. 用基于熵值赋权的DTOPSIS法综合评价水稻品种. 山东农业科学, 2022, 54(7): 39-45.

[10] Zhang Z Z, Zheng C Z, Xu Z P, *et al*. Comprehensive evaluation of forage performance of different oat varieties based on

entropy weighted DTOPSIS method. Feed Research, 2023, 46(16): 114－120.
张子臻, 郑成忠, 徐振朋, 等. 基于熵值赋权DTOPSIS法对不同燕麦品种饲草生产性能综合评价. 饲料研究, 2023, 46(16): 114－120.

[11] Zhang S, Xu K W, Pei L Z, *et al*. Grey correlation analysis of meteorological factors, maize lodging and yield in the hilly region of central Sichuan. Journal of Sichuan Agricultural University, 2021, 39(5): 666－673, 680.
张森, 徐开未, 裴丽珍, 等. 川中丘陵区气象因子与玉米倒伏和产量的灰色关联度分析. 四川农业大学学报, 2021, 39(5): 666－673, 680.

[12] Zhang F, Xiao B. Grey correlation analysis between tea yield and meteorological factors－case study of tea region in southern Shaanxi. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2018, 27(5): 735－740.
张璠, 肖斌. 茶叶产量与气象因子的灰色关联度分析—以陕南茶区为例. 西北农业学报, 2018, 27(5): 735－740.

[13] Gu Z C, Wang Y, Wang Y F, *et al*. Relevance analyses between different meteorological factors and flue-cured tobacco leaf chemistry compositions in Yunnan Province. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(10): 243－248.
古战朝, 王毅, 王逸飞, 等. 云南烟区气象因子与烤烟化学成分的灰色关联度分析. 中国农学通报, 2012, 28(10): 243－248.

[14] Xu G, Pan J, Wang T, *et al*. Yield, nutritional quality, and economic benefits of six silage maize varieties after phosphorus application. Pratacultural Science, 2025, 42(8): 2123－2133.
徐广, 潘洁, 王涛, 等. 施磷对6个青贮玉米品种产量、营养品质和经济效益的影响. 草业科学, 2025, 42(8): 2123－2133.

[15] State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Determination of crude protein in feeds-Kjeldahl method: GB/T 6432－2018. Beijing: Standards Press of China, 2018.
国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 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.

[16] State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Determination of neutral detergent fiber (NDF) in feeds: GB/T 20806－2022. Beijing: Standards Press of China, 2022.
国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 饲料中中性洗涤纤维(NDF)的测定: GB/T 20806－2022. 北京: 中国标准出版社, 2022.

[17] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Determination of acid detergent fiber (ADF) in feeds: NY/T 1459－2022. Beijing: Standards Press of China, 2022.
中华人民共和国农业农村部. 饲料中酸性洗涤纤维(ADF)的测定: NY/T 1459－2022. 北京: 中国标准出版社, 2022.

[18] General Administration of Quality Supervision, National Standardization Administration. Inspection of grain and oils－Determination of crude fat content in maize－Near-infrared method: GB/T 24902－2010. Beijing: Standards Press of China, 2010.
国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 粮油检验 玉米粗脂肪含量测定 近红外法: GB/T 24902－2010. 北京: 中国标准出版社, 2010.

[19] General Administration of Quality Supervision, National Standardization Administration. Animal feeding stuffs－Determination of crude ash: GB/T 6438－2007. Beijing: Standards Press of China, 2007.
国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 饲料中粗灰分的测定: GB/T 6438－2007. 北京: 中国标准出版社, 2007.

[20] State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Determination of starch content-Polarimetry: GB/T 20194－2018. Beijing: Standards Press of China, 2018.
国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 动物饲料中淀粉含量的测定－旋光法: GB/T 20194－2018. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[21] Hansen J, Møller I. Percolation of starch and soluble carbohydrates from plant tissue for quantitative determination with anthrone. Analytical Biochemistry, 1975, 68(1): 87－94.

[22] Rohweder D A, Barnes R F, Jorgensen N. Proposed hay grading standards based on laboratory analyses for evaluating quality. Journal of Animal Science, 1978, 47(3): 747－759.

[23] Xu X X, Wang L N, Ding X Y, *et al*. Comprehensive evaluation of production performance and silage quality of different maize varieties in Tongliao area. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(9): 3068－3076.
徐欣欣, 王莉娜, 丁雪妍, 等. 通辽地区不同类型玉米品种生产性能和青贮品质综合评价. 草地学报, 2025, 33(9): 3068－3076.

[24] Song X L, Wu Y, Yang X L, *et al*. Comparison of entropy weighted DTOPSIS method and grey relational degree analysis in comprehensive evaluation of maize varieties. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(2): 41-46.
宋秀丽, 吴玥, 杨锡朗, 等. 基于熵值赋权的DTOPSIS法与灰色关联度分析在玉米品种综合评价中的比较. 玉米科学, 2020, 28(2): 41-46.

[25] He P L, Jie H D, Zhu N J, *et al*. Comparison of silage maize production performance in the eastern and western regions of Hunan Province. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(3): 977-984.
何鹏亮, 揭红东, 朱宁静, 等. 湖南东西部地区青贮玉米生产性能比较研究. 草地学报, 2024, 32(3): 977-984.

[26] Dumont B, Andueza D, Niderkorn V, *et al*. A meta-analysis of climate change effects on forage quality in grasslands: specificities of mountain and Mediterranean areas. Grass and Forage Science, 2015, 70(2): 239-254.

[27] Mu X Y, Song M, Ma Z Y, *et al*. Responses of photosynthetic characteristics and yield of summer maize to high temperature stress during flowering. Journal of Southern Agriculture, 2025, 56(5): 1361-1378, 1343.
穆心愿, 宋淼, 马智艳, 等. 夏玉米光合特性及产量对花期高温胁迫的响应. 南方农业学报, 2025, 56(5): 1361-1378, 1343.

[28] Liu P, Guo W S, Pu H C, *et al*. Effects of transient high temperature during grain filling period on starch formation in wheat (*Triticum aestivum* L.). Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(2): 182-188.
刘萍, 郭文善, 浦汉春, 等. 灌浆期短暂高温对小麦淀粉形成的影响. 作物学报, 2006, 32(2): 182-188.

[29] Lu Q, Yang H X, Ci L J, *et al*. Effect of radiation transmission on crop yield and quality. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(1): 38-46.
卢琦, 阳含熙, 慈龙骏, 等. 农桐间作系统辐射传输对农作物产量和品质的影响. 生态学报, 1997, 17(1): 38-46.

[30] Hamdollah E, Ahmad G, Mohammad M, *et al*. Forage quality of cow pea (*Vigna sinensis*) intercropped with corn (*Zea mays*) as affected by nutrient uptake and light interception. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 2009, 37(1): 171-174.

[31] Liu M, Gong J R, Pan Y, *et al*. Effects of grass-legume mixtures on the production and photosynthetic capacity of constructed grasslands in Inner Mongolia, China. Crop and Pasture Science, 2016, 67(11): 1188-1198.

[32] Gorooei A, Gaiser T, Aynehband A, *et al*. The effect of farming management and crop rotation systems on chlorophyll content, dry matter translocation, and grain quantity and quality of wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in a semi-arid region of Iran. Agronomy, 2023, 13(4): 1007.

[33] Yan X D, Xia Y, Ren M L, *et al*. The spatio-temporal distribution of precipitation during warm season in Guizhou and its relationship with atmospheric circulation anomalies. Journal of Mountain Meteorology, 2024, 48(6): 1-8.
严小冬, 夏阳, 任曼琳, 等. 贵州暖季降水时空分布及其与大气环流异常的关系. 山地气象学报, 2024, 48(6): 1-8.

[34] Bi W X, Wang M K, Weng B S, *et al*. Effects of drought-flood abrupt alternation on the growth of summer maize. Atmosphere, 2020, 11(1): 21.

[35] Ahmed N, Tetlow I J, Nawaz S, *et al*. Effect of high temperature on grain filling period, yield, amylose content and activity of starch biosynthesis enzymes in endosperm of basmati rice. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(11): 2237-2243.

[36] Gu X T, Zhang X Y, Lu W P, *et al*. Starch structural and functional properties of waxy maize under different temperature regimes at grain formation stage. Food Chemistry: X, 2022, 16: 100463.

[37] Zhang Z J, Yang G H, Guo R H, *et al*. Comprehensive evaluation of regional trials for the spring maize in northwest China based on DTOPSIS method and membership function method. Crops, 2025, 41(3): 78-84.
张正洁, 杨国华, 郭瑞红, 等. 采用DTOPSIS法和隶属函数法对西北春玉米区域试验的综合评价. 作物杂志, 2025, 41(3): 78-84.

[38] Wang J, Kong L G, Li B Q, *et al*. Wheat varieties in southern Shandong Province: comprehensive evaluation by DTOPSIS method based on entropy weight. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(12): 1-7.
王靖, 孔令国, 李宝强, 等. 基于熵值赋权的DTOPSIS法对小麦品种的综合评价研究. 中国农学通报, 2023, 39(12): 1-7.