

# 近红外漫反射光谱法测定青贮玉米品质性状的研究

白琪林<sup>1,2</sup>, 陈绍江<sup>1</sup>, 严衍禄<sup>3</sup>, 朱雨杰<sup>4</sup>, 戴景瑞<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国农业大学国家玉米改良中心, 北京 100094; <sup>2</sup> 山西省农业科学院作物遗传研究所, 太原 030031; <sup>3</sup> 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100094; <sup>4</sup> 布鲁克光谱仪器公司北京代表处, 北京 100081)

**摘要:** 【目的】研究利用近红外漫反射光谱法 (NIDRS) 测定青贮玉米的体外干物质消化率 (IVDMD)、中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤纤维 (ADF)、粗蛋白 (CP) 和粗脂肪 (EE) 含量的可行性。【方法】以普通、高油和超高油玉米全株和秸秆的青贮样为材料, 采用光谱的主成分空间技术和偏最小二乘回归法 (PLS)。【结果】所建立的 IVDMD、NDF、ADF、CP 和 EE 的校正模型的交叉验证决定系数 ( $R^2_{cv}$ ) 分别为 0.9133、0.9764、0.9789、0.9254 和 0.7294, 外部验证决定系数 ( $R^2_{val}$ ) 分别为 0.8879、0.9455、0.9635、0.9387 和 0.7333, 各项误差(RMSEE、RMSECV 和 RMSEP)为 0.24(CP)~2.23(NDF)。【结论】利用近红外漫反射光谱法测定青贮玉米品质性状是完全可行的, 该结果可满足畜牧业对青贮饲料品质快速分析的需要, 对青贮玉米育种材料的快速鉴定筛选具有重要的意义。

**关键词:** 玉米; 青贮; 品质性状; 近红外漫反射光谱; 校正模型

## 0 引言

【本研究的重要意义】青贮玉米具有较高的生物学产量和良好的饲料转化效率, 是草食家畜重要的饲料来源 [1]。青贮可保持玉米青绿时的鲜嫩汁液, 其植株经过乳酸发酵后, 质地柔软, 具有酒香味, 适口性好, 且易消化吸收, 是反刍动物良好的粗饲料 [2]。青贮玉米的营养价值主要取决于以下两个方面: 一是其体外干物质消化率 (in vitro dry matter digestion, IVDMD), 二是其自身营养品质。IVDMD 主要取决于秸秆中性洗涤纤维 (neutral detergent fiber, NDF)、酸性洗涤纤维 (acid detergent fiber, ADF) 含量; 营养品质则与粗蛋白 (crude protein, CP) 和粗脂肪 (etherextract, EE) 等含量有关。青贮玉米 IVDMD 可以直接通过动物饲喂试验和体外瘤胃发酵两步法 [3] 进行评价, 但测定难度都很大, 均存在费力、耗时和费用高等缺点。用传统方法分析 NDF、ADF、CP 和 EE 含量, 也存在测定速度慢、成本高, 而且使用试剂有害的弊端。近红外漫反射光谱 (NIDRS) 信息丰富, 非常适合多组分测定, 具有测定速度快, 样品制备简单, 不耗费化学试剂、操作简便等优点 [4]。因此研究利用 NIDRS 快速、准确测定青贮玉米品质性状的方法, 对畜牧业发展和青贮玉米育种均具有十分重要的意义。【前人研究进展】NIDRS 是 20 世纪 80 年代后期迅速发展起来的一种技术, 在国外已成为分析农作物品质的重要手段 [5~10], 并广泛应用于玉米秸秆 NDF 与 ADF 含量、IVDMD 和其它营养成分的研究与评价上 [11~15]。关于建立玉米青贮后品质性状的校正模型, 国外类似工作很少, 仅见 Boever 等 [12] 用 NIDRS 预测全株玉米青贮后, 其有机物 (OM)、CP、NDF 和淀粉 (STA) 在牛体内降解量模型报道。国内 NIDRS 在玉米上应用, 也仅见用于测定籽粒品质和秸秆品质 [16~19], 尚未见有将之用于玉米青贮后品质性状的测定。【本研究的切入点】优质青贮玉米育种的难点是缺乏快速可靠的实验室分析技术, 不能很好地对玉米材料的营养品质进行选择鉴定 [20]。由于目前国内应用 NIDRS 技术测定青贮玉米品质尚属空白, 而青贮玉米育种和发展畜牧业又非常需要快速、准确的 NIDRS 分析技术, 因此进行此项研究对中国青贮玉米育种和畜牧业的发展具有重要的促进作用。【拟解决的关键问题】本文采用 NIDRS 技术, 在国内首次建立玉米青贮后 IVDMD 及其相关品质性状的 NIDRS 定量分析模型, 期望解决青贮玉米品质分析中繁琐、耗时和费力的问题, 为青贮玉米品质育种提供快速分析测定的技术保障。

# 1 材料与amp;方法

## 1.1 试验材料

2003 年普通、高油和超高油玉米每一品种籽粒达乳线到 3/4 和 4/4 乳线期时，分别收获带穗整株玉米和不带穗玉米秸秆，2004 年在以上 3 种玉米类型籽粒乳线达到 3/4 乳线期时，仅收获玉米秸秆，以上样品代表生产上带穗青贮和不带穗青贮两种青贮玉米类型。其中，普通玉米籽粒含油量为 3%~4%，由普通系与普通系杂交而成；高油玉米籽粒含油量为 6%~10%，由高油系与普通系杂交而成；超高油玉米籽粒含油量一般超过 10%，由高油系与高油系杂交而成。样品收获后，尽快用青贮铡草机切短，然后用锤式粉碎机粉碎，混匀后，取一定量样品装入 1000 ml 广口瓶中，压实，密封，分别制成带穗青贮和不带穗青贮两类青贮样品。随后将样品置于室内，室温下发酵 60~90 d 后，开瓶取样，60℃恒温下烘干，最后用 9FQ-235 锤式粉碎机粉碎，过 40 目筛，分别装入密封塑料袋中封口备用。以上带穗整株青贮样共 225 份，3/4 乳线期和 4/4 乳线期的秸秆青贮样计 450 份，两种类型样品共计 675 份。其中，因取样时期以及带穗与否的不同，两年之间所有样品没有重复的材料。

## 1.2 方法

1.2.1 仪器与试剂 VECTOR22/N 傅里叶变换近红外光谱仪（德国 BRUKER 公司），以及配套 Quant 定量分析软件，积分球附件，石英样品杯。扫描范围为 4 000~12 000/cm，扫描次数为 64 次，分辨率为 8/cm。胃蛋白酶（1 : 1000，美国 Jenview 公司）其余试剂为分析纯。

1.2.2 近红外光谱采集与标样的选取适量的青贮玉米样品盛入直径 50 mm 的旋转样品杯，用不锈钢压样制样器在样品杯内制样，扫描样品的近红外光谱，每个样品重复装样 3 次，取平均值进行计算。同时利用光谱多维主成分特征的空间分布情况，从 675 份样品中选择标样，用来建立校正模型。

1.2.3 青贮样品 IVDMD、NDF、ADF、CP 和 EE 的测定 样品的 IVDMD 按体外瘤胃发酵两步法测定，瘤胃液采自 4 头装有永久瘤胃瘘管的荷斯坦阉公牛，NDF 与 ADF 按 Van Soest [21] 方法进行测定，CP 和 EE 分别按半微量凯氏法和油重法进行测定，所有样品均平行测定 3 次取均值，结果以干基（%）表示。

1.2.4 建立 NIDRS 数学模型的方法 建立 NIDRS 模型的化学计量学方法是偏最小二乘（partial leastsquare, PLS）分析法。将样品分为校正集和验证集，先用校正样品集建立校正模型并作交叉验证，再用验证样品集进行外部验证，最后根据  $R^2_{cal}$ 、 $R^2_{cv}$ 、 $R^2_{val}$ 、RMSECV、RMSEP 等指标确定最优模型。采用 OPUS/QUANT4.0 商用光谱定量分析软件对模型进行优化，确定光谱预处理、谱区选择和回归统计分析。

# 2 结果与分析

## 2.1 样品的选择

由于全部 675 个试验样品来自 2 个年度、不同品种类型和不同收获期的全株青贮和秸秆青贮，数量很大，不可能全部进行实验室测定，为此对全部样品的光谱矩阵进行主成分分析，并从中选取了 150 个样品作为建模样品集（包括校正和验证集）。下图为所有样品的前两个主成分得分（PCS）的分布图，空心点表示选出的样品，实心点表示未选样品，由图可见，所选取的 150 个样品基本能涵盖原来 675 个样品的信息。

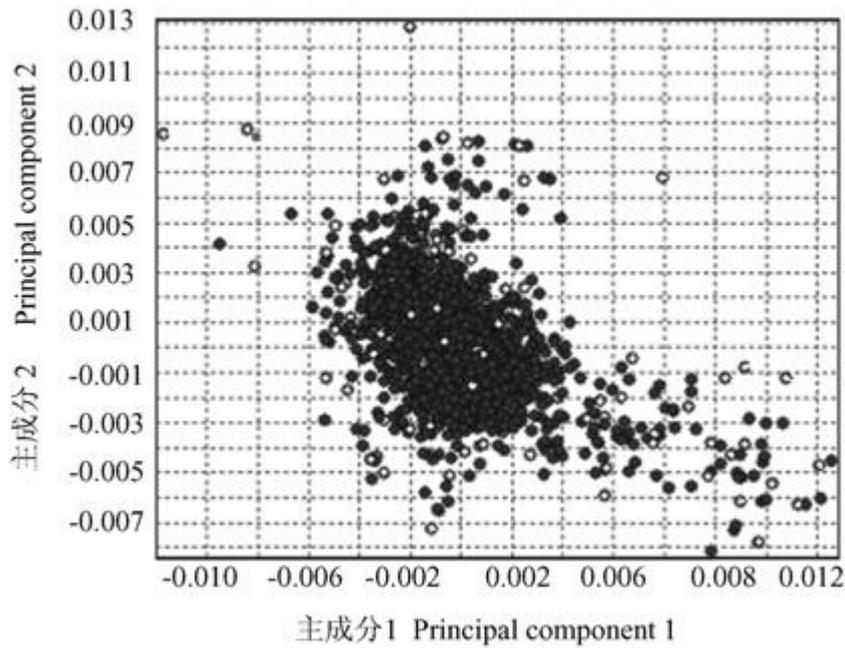


图 主成分空间选择代表性样品

Fig. Selection of representative samples

## 2.2 样品 IVDMD 及其化学成分的测定结果

根据各品质性状化学测定相对误差大小,剔除部分相对误差较大和个别界外点(outlier)样品外,实际参与建模的青贮样品数及测定结果见表 1。由表 1 可见,样品 IVDMD 等性状的变幅很大,基本上覆盖了青贮玉米品种选育中可能出现的 IVDMD 等性状的含量变化范围,具有很好的样本代表性,可以用于建立玉米青贮后品质性状的 NIDRS 校正模型。

表 1 青贮玉米 IVDMD、NDF、ADF、EE 和 CP 测定结果

Table 1 Measured results of IVDMD, NDF, ADF, EE and CP of ensiled maize samples

| 性状<br>Traits | 样本数<br>No. of sample | 变幅<br>Range (%) | 平均<br>Mean (%) | 标准差<br>SD (%) |
|--------------|----------------------|-----------------|----------------|---------------|
| IVDMD        | 127                  | 37.14~66.65     | 57.31          | 6.85          |
| NDF          | 147                  | 38.34~73.84     | 55.75          | 9.87          |
| ADF          | 148                  | 23.10~48.88     | 34.30          | 7.52          |
| EE           | 126                  | 1.89~8.24       | 4.45           | 1.55          |
| CP           | 144                  | 5.09~11.77      | 7.48           | 1.14          |

## 2.3 IVDMD、NDF、ADF、EE 和 CP 数学模型的建立与优化

本试验利用 OPUS/QUANT4.0 软件,筛选青贮样品的最佳建模光谱预处理方法、谱区范围和主成分维数。通过交叉验证,比较不同光谱预处理方法与谱区范围组合的交叉验证决定系数( $R^2_{cv}$ )、交叉验证标准差(RMSECV)和校正决定系数( $R^2_{cal}$ )等参数,比较其结果,并确定青贮样 IVDMD 等不同组分建立数学模型的最佳条件(表 2)。由表 2 可以看出,性状不同,其最佳建模条件也各不相同。在此建模条件下,各性状模型的决定系数最大,标准误差最小。表 3 为利用以上建模条件的校正、验证结果。从表 3 可以看出,除 EE 含量外,各模型的校正决定系数和交叉验证决定系数均较高,且所有性状的决定系数均达极显著水平( $P < 0.01$ )。IVDMD、NDF、ADF、CP 和 EE5 个校正模型的校正决定系数( $R^2_{cal}$ )为 0.9352~0.9843,校正误差(RMSEE)为 0.24%~1.84%,交叉验证决定系数( $R^2_{cv}$ ),为 0.9133~0.9789,交叉验证误差(RMSECV)分别为 0.32%~2.06%。上述结果表明,所建模型的各项决定系数和标准差,已满足农业样品对准确度的要求。

表 2 青贮样品品质性状最佳建模条件

Table 2 The optimal conditions of establishing NIDRS prediction models for ensiled samples quality traits

| 性状     | 适宜谱区                         | 光谱处理方法                      | 主成分维数 |
|--------|------------------------------|-----------------------------|-------|
| Traits | Range of wave number         | Spectral data preprocessing | Ranks |
| IVDMD  | 7501.7~6097.8, 4601.3~4246.5 | 多元散射校正 MSC                  | 8     |
| NDF    | 7501.7~5449.8, 4423.9~4246.5 | 一阶导数+直线扣减 1st Deriv.+SLS    | 8     |
| ADF    | 7501.7~5449.8, 4601.3~4246.5 | 一阶导数+直线扣减 1st Deriv.+SLS    | 8     |
| EE     | 6799.8~6097.8, 5453.7~4246.5 | 一阶导数+多元散射校正 1st Deriv.+MSC  | 9     |
| CP     | 7501.7~4246.5                | 一阶导数+多元散射校正 1st Deriv.+MSC  | 7     |

MSC: Multivariate scattering Correction; 1st Deriv: First derivative; SLS: Straight line subtraction

表 3 玉米青贮样 5 个品质性状的校正结果

Table 3 The results of calibration of 5 quality traits for ensiled samples

| 性状     | 样品数            | 校正 Calibration |             | 交叉验证 Cross validation |            |
|--------|----------------|----------------|-------------|-----------------------|------------|
|        |                | RMSEE          | $R^2_{cal}$ | RMSECV                | $R^2_{cv}$ |
| Traits | No. of samples |                |             |                       |            |
| IVDMD  | 87             | 1.84           | 0.9352**    | 2.06                  | 0.9133**   |
| NDF    | 98             | 1.30           | 0.9843**    | 1.53                  | 0.9764**   |
| ADF    | 99             | 0.96           | 0.9851**    | 1.09                  | 0.9789**   |
| EE     | 90             | 0.76           | 0.7851**    | 0.82                  | 0.7294**   |
| CP     | 97             | 0.24           | 0.9613**    | 0.32                  | 0.9254**   |

\*\* represents significant at 0.01 level of probability, the same as following. RMSEE=root mean square error of estimation;  $R^2_{cal}$ =coefficient of determination of validation; RMSECV=root mean square error of cross validation;  $R^2_{cv}$ = coefficient of determination of cross validation

## 2.4 青贮玉米品质性状校正模型预测效果分析

校正模型建立后, 采用外部验证的方法, 对所建模型实际预测效果进行评价检验, 并对青贮样品各性状的预测值和化学值进行成对数据双尾 t 测验 (表 4)。从表 4 可以看出, 各性状化学值与预测值间的 t 检验值均未达到显著水平, 表明预测值与化学值间的差异不显著。各性状外部验证决定系数 ( $R^2_{val}$ ) 均达极显著水平,  $R^2_{val}$  除 EE 较小外, 其余性状为 0.8879~0.9635, 预测误差 (RMSEP) 为 0.26~2.23, 各性状预测值与化学值间平均偏差 (Bias) 为-0.09~0.30; IVDMD、NDF、ADF、CP 和 EE 验证集的预测值与化学值间的相关系数 r 均达极显著水平, r 分别为 0.9433 (IVDMD)、0.9730 (NDF)、0.9818 (ADF)、0.9694 (CP) 和 0.8668 (EE), 说明二者存在较强的相关性。上述结果表明预测值与化学值比较接近, 所建模型具有较高的预测准确度, 可用来对未知样品进行实际预测。

表 4 青贮样 5 个品质性状的验证结果

Table 4 The results of external validation for calibration models of 5 quality traits

| 性状     | 样本数            | ANL   | LAB   | r        | t 值     | P 值     | 验证 Validation |             |       |
|--------|----------------|-------|-------|----------|---------|---------|---------------|-------------|-------|
|        |                |       |       |          |         |         | RMSEP         | $R^2_{val}$ | Bias  |
| Traits | No. of samples |       |       |          | t value | P value |               |             |       |
| IVDMD  | 40             | 57.98 | 57.75 | 0.9433** | 0.675   | 0.5065  | 2.15          | 0.8879**    | -0.23 |
| NDF    | 49             | 55.50 | 55.80 | 0.9730** | 0.9245  | 0.3599  | 2.23          | 0.9455**    | 0.30  |
| ADF    | 49             | 34.48 | 34.40 | 0.9818** | 0.4272  | 0.6712  | 1.42          | 0.9635**    | -0.09 |
| EE     | 36             | 4.44  | 4.28  | 0.8668** | 1.3119  | 0.1981  | 0.74          | 0.7333**    | -0.16 |
| CP     | 47             | 7.41  | 7.44  | 0.9694** | 0.7227  | 0.4738  | 0.26          | 0.9387**    | 0.03  |

The ANL means average value analyzed by NIDRS, LAB means average value analyzed by chemical method of laboratory, respectively. RMSEP= root mean square error of prediction;  $R^2_{val}$ = coefficient of determination of validation; Bias=mean difference between the predicted and actual value of external validation samples

## 3 讨论

### 3.1 应用 NIDRS 快速测定青贮玉米品质性状的可行性

目前, 国内已有用 NIDRS 测定玉米籽粒蛋白质和淀粉含量的报道 [16], 但迄今尚未见有用 NIDRS 测定玉米青贮品质性状的报道。与建立玉米籽粒品质性状的 NIDRS 校正模型相比, 建立青贮玉米 IVDMD 及其相关品质性状校正模型的难度很大。究其原因, 主要是青贮样品前处理程序多, 首先要通过复杂的工序制作青贮样, 然后需长时间的发酵、烘干、

粉碎方能制好实验样品。另外测定方法繁琐费时,干扰因素多,难以及时提供准确分析数据。如实验室测定 IVDMD,主要是利用牛瘤胃液中的微生物来消化秸秆中的有机物和部分纤维素,因而需要饲养装有永久瘤胃瘘管的牛并取其瘤胃液,而且青贮样品需在瘤胃液中厌氧条件下发酵,同时还存在所取瘤胃液中的微生物因不同个体牛之间和因饲喂不同饲料造成的差异,从而影响测定的准确性。由于 NIDRS 分析青贮玉米品质性状,样品不需任何预处理,并具有快速、简便、廉价和多种成分同时测定的优点 [23],所以本试验以 NIDRS 技术为基础,建立了青贮玉米定量分析数学模型,简化了常规分析程序,较好地解决了青贮玉米常规分析方法难以解决的问题。本试验所建立的 NIDRS 测定玉米整株和秸秆青贮的 IVDMD、NDF、ADF、EE 和 CP 含量的校正模型,除 EE 模型的交叉验证决定系数和外部验证决定系数较低外,IVDMD、NDF、ADF 和 CP 模型的交叉验证和外部验证决定系数可达 0.8879~0.9789,但各项误差均较小(0.24~2.23)。Cozzolino 等 [14] 以整株普通玉米为样品,建立了 CP、ADF 和 NDF 校正模型,其外部验证决定系数分别为 0.86 (CP)、0.98 (ADF) 和 0.83 (NDF),预测标准差分别为 1.04 (CP)、1.85 (ADF) 和 2.43 (NDF)。关于玉米青贮后所建立的品质性状校正模型,国内外类似研究很少,报道不多。仅见 Boever 等 [12] 用 NIRS 预测了 26 份全株普通玉米青贮后,其有机物(OM)、CP、NDF 和淀粉(STA)在牛体内降解量模型,其外部验证决定系数分别为 0.72(OM)、0.79 (CP)、0.52 (NDF) 和 0.65 (STA),预测标准差分别为 3.4(OM)、0.30 (CP) 2.2 (NDF) 和 0.69 (STA)。这表明,本试验所建立的 5 个青贮玉米品质性状定量分析模型,具有较高的质量。此外,本实验所用的样品数量大,类型多,有普通、高油和超高油玉米,还有不同收获时期的样品,因而具有很好的代表性。这 3 种类型的玉米青贮时,又包括带穗全株青贮和秸秆青贮两种方式,因而适配范围更宽,将这些模型用于青贮玉米育种,可满足大量青贮材料的筛选要求,并显著提高其选育效率,也为生产上全株带穗青贮和秸秆青贮对品质快速分析体系的建立提供了重要的技术支持。

### 3.2 影响 NIDRS 分析准确性的因素

NIDRS 作为一种间接测定技术,其分析准确性受一些因素影响,其中受样品因素的影响较大,如样品中化学成分间的交互作用以及被测物质成分浓度大小。本试验在建立青贮样品粗脂肪 NIDRS 校正模型时,其交叉验证决定系数较小,为 0.7333。虽然在粗脂肪测定时,全部测定均重复 3 次以上,测定相对误差全部控制在 2%之内,但建模结果仍不尽如人意。其原因主要是玉米秸秆纤维含量高,存在油和纤维的交互作用 [24],结果高纤维含量的成分掩盖了低浓度或弱吸收脂肪的成分,因而所选择的波长对低浓度或弱吸收的成分缺乏敏感性。虽然青贮玉米样品中粗脂肪含量变幅在 1.89%~8.24%,但由于存在这种交互作用,从而影响其测定的准确度,这是青贮样粗脂肪建模时交叉验证决定系数较低的可能原因。尽管如此,该模型仍基本上能满足育种的实际需要。

### 3.3 关于模型的维护

近红外光谱的分析基础是数学模型。为提高近红外光谱分析的精确度与准确度,本研究在建立玉米秸秆消化率及其相关品质性状的校正模型时,通过主成分空间技术对建模样品进行了挑选,同时进行了适当的光谱预处理和谱区范围的合理选择,因而提高了模型的稳定性。另一方面,本研究所建立起来的消化率及其相关品质性状的每一模型都有各自的适配范围,如果今后待测定样品本身的某性状浓度超出了所建模型的适应范围时,就需要扩大校正样品集所覆盖的范围,在原有的模型中添加包含新信息的样品 [11, 24],以保证其测定的准确性。

## 4 结论

近红外光谱法测定青贮玉米 IVDMD 等品质性状,不需要对样品进行复杂繁琐的前处理,可同时分析多个组分,分析速度快,结果准确,具有常规化学方法所不具有的优点,因此利用近红外漫反射光谱法测定青贮玉米品质性状是完全可行的,该结果可满足畜牧业对青贮饲料品质快速分析的需要,对青贮玉米育种材料的快速鉴定筛选具有重要意义。

### References

- [1] Argillier O, Méchin V, Barrière Y. Inbred line evaluation and breeding for digestibility related traits in forage maize. *Crop Science*,2000, 40: 1596-1600.
- [2] 卞田, 吴融. 青贮玉米. 北京: 科学技术文献出版社, 1992: 1-3. Bian T, Wu R. *Silage Maize*. Beijing: Scientific and Technical Documents Press, 1992: 1-3. (in Chinese)
- [3] Tilley J M A, Terry R A. A two-stage technique for the in vitro digestion of forage crops. *Journal of British Grassland Society*, 1963,18: 104-111.
- [4] 严衍禄, 赵龙莲, 李军会, 张录达, 闵顺耕. 现代近红外光谱分析的信息处理技术. *光谱学与光谱分析*, 2000, 20: 777-780. Yan Y L, Zhao L L, Li J H, Zhang L D, Min S G. Information for technology of modern NIR spectral analysis. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2000, 20: 777-780. (in Chinese)
- [5] Villareal C P, Dela Cruz N M, Juliano B O. Rice amylase analysis by near-infrared transmittance spectroscopy. *Cereal Chemistry*, 1994, 71:292-296.
- [6] Delwiche S R, Bean M M, Miller R E, Webb B D, Willams P C. Apparent amylase content of milled rice by near-infrared reflectance spectroscopy. *Cereal Chemistry*, 1995, 72: 182-187.
- [7] Delwiche S R, Hruschka W R. Protein content of bulk wheat from near-infrared reflectance of individual kernels. *Cereal Chemistry*,2000, 77: 86-89.
- [8] Kim H O, Williams P C. Determination of starch and energy in feed grains by near-infrared reflectance spectroscopy. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 1990, 38: 682-688.
- [9] Orman B A, Schumann J R A. Comparison of near-infrared reflectance spectroscopy. *Journal of Agricultural Food Chemistry*,1991, 39: 883-888.
- [10] Campbell M R, Brumm T J, Glover D V. Whole grain amylase analysis in maize using near-infrared transmittance spectroscopy. *Cereal Chemistry*, 1997, 74: 300-303.
- [11] Albanell E, Plaixats J, Ferret A. Evaluation of near infrared reflectance spectroscopy for predicting stover quality trait in semi-exotic populations of maize plants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1995, 69: 269-273.
- [12] De Boever J L, Vanacker J M, De Brabander D L. Rumen degradation characteristics of nutrients in maize silages and evaluation of laboratory measurements and NIRS as predictors. *Animal Feed Science and Technology*, 2002, 101: 73-86.
- [13] Welle R, Greten W, Rietmann B, Alley S, Sinnaeve G, Dardenne P. Near infrared spectroscopy on chopper to measure maize forage quality parameters online. *Crop Science*, 2003, 43: 1407-1413.
- [14] Cozzolino D, Fassio A, Gimenez A. The use of near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to predict the composition of whole maize plants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2000,81: 142-146.
- [15] Jung H G, Mertens D R, Buxton D R. Forage quality variation among maize inbred: In vitro fiber digestion kinetics and prediction with NIRS. *Crop Science*, 1998, 38: 205-210.
- [16] 魏良明, 严衍禄, 戴景瑞. 近红外反射光谱测定玉米完整籽粒蛋白质和淀粉含量的研究. 中

- 国农业科学, 2004, 37: 630-633. Wei L M, Yan Y L, Dai J R. Determining protein and starch contents of whole maize kernel by near infrared reflectance spectroscopy(NIRS). *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37: 630-633. (in Chinese)
- [17] 卢宝红, 张俊, 张义荣, 魏良明, 戴景瑞, 李建生. 玉米完整籽粒近红外品质分析模型比较及改进. *中国粮油学报*, 2005, 20(4): 44-49. Lu B H, Zhang J, Zhang Y R, Dai J R, Li J S. Comparison and improvement of quality analytical models for whole maize kernels using near infrared spectroscopy. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2005, 20(4): 44-49. (in Chinese)
- [18] 白琪林, 陈绍江, 董晓玲, 孟庆祥, 严衍禄, 戴景瑞. 近红外漫反射光谱法测定玉米秸秆 NDF 与 ADF 含量. *光谱学与光谱分析*, 2004, 24: 1345-1347. Bai Q L, Chen S J, Dong X L, Meng Q X, Yan Y L, Dai J R. Prediction of NDF and ADF concentrations with Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2004, 24: 1345-1347. (in Chinese)
- [19] 吴军, 白琪林, 苏胜宝, 陈绍江, 孟庆翔, 严衍禄. 近红外反射光谱法分析玉米秸秆纤维素含量的研究. *分析化学*, 2005, 33: 1421-1423. Wu J, Bai Q L, Su S B, Chen S J, Meng Q X, Yan Y L. Near-infrared reflectance spectroscopy analysis of cellulose content in corn stalk. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2005, 33: 1421-1423. (in Chinese)
- [20] 扈光辉. 饲用玉米的育种进展与趋势. *玉米科学*, 2003, 11(2): 46-49. Hu G H. Development and trend on forage maize breeding. *Journal of Maize Sciences*, 2003, 11(2): 46-49. (in Chinese)
- [21] Van Soest P J, Robertson J B, Lew B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 1991, 74: 3583-3597.
- [22] 杨胜. 饲料分析及饲料质量检测技术. 北京: 北京农业大学出版社, 1993. Yang S. *Analysis of Feed and Assay Methodology of Feed Quality*. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1993. (in Chinese)
- [23] 徐广通, 袁洪福, 陆婉珍. 现代近红外光谱技术及应用进展. *光谱学与光谱分析*, 2000, 20: 134-142. Xu G T, Yuan H F, Lu W Z. Development of modern near infrared reflectance spectroscopy techniques and applications. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2000, 20(2): 134-142. (in Chinese)
- [24] 严衍禄. 近红外光谱分析基础与应用. 北京: 中国轻工业出版社, 2005: 190-260. Yan Y L. *Fundamental and Application of Near Infrared Reflectance Spectroscopy Analysis*. Beijing: China Light Industry Press, 2005: 190-260. (in Chinese)



广州市淘仪贸易有限公司

**MATRIX-F**