

近红外光谱技术在饲草分析中的应用现状及展望

任秀珍^{1,3}, 郭宏儒³, 贾玉山², 格根图², 王 堃^{1*}

1 中国农业大学草地研究所, 北京 100094

2 内蒙古农业大学生态环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010019

3 内蒙古民族大学, 内蒙古 通辽 028042

摘 要 饲草是畜牧业生产的物质基础, 饲草质量的好坏直接关系到畜产品质量的好坏。控制饲草质量、检测饲草原料的成分是饲草生产中非常重要的一环。近红外光谱技术是 20 世纪 70 年代发展起来的一项高效、快速的现代分析技术。它综合运用了计算机技术、光谱技术和化学计量学等多个学科的最新研究成果, 以其独特的优点在多个领域得到了广泛的应用。尽管 NIRS 技术在饲草分析上的应用起步较晚, 但越来越被人们所重视。目前, 近红外光谱技术不仅能测定饲草中的水分、粗蛋白、粗纤维和粗脂肪等常规成分, 还能测定饲草中的矿物质、微量元素和酶类等非常规成分, 预测饲草的抗营养成分。而且还可进行饲草的生物学效价评定, 从而评定饲草的利用率及营养价值, 并能分析草地的植物组成和饲草的茎叶比例。文章综合阐述了近红外光谱技术在饲草分析中的应用现状, 并对其应用前景进行了展望。

关键词 近红外光谱技术; 饲草分析; 应用现状; 展望

中图分类号: S812 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)03-0635-06

1 近红外光谱分析技术简介

近红外光谱 (near infrared reflectance spectroscopy, NIRS) 分析技术是 20 世纪 70 年代发展起来的一项高效、快速的现代分析技术。它综合运用了计算机技术、光谱技术和化学计量学等多个学科的最新研究成果, 以其独特的优点在多个领域特别是农业领域得到广泛的应用。随着计算机技术的发展和化学计量学研究的深入, 加之近红外光谱仪器制造技术的日趋完善, 促进了 NIRS 分析技术的极大发展。

NIRS 分析技术按检测光的不同可分为近红外反射 (near infrared reflectance, NIR) 和近红外透射 (near infrared transmittance, NIT) 两种, 目前在饲草领域的实际应用研究中普遍使用近红外漫反射光谱。NIRS 法是应用饲草中各种有代表的有机成分在 NIRS 区域的光学吸收特性, 且不同成分的最强吸收波长不同, 吸收的强度与饲草有机物含量成正比的原理, 通过对已知化学成分含量的样品与其近红外反射光谱的回归分析, 建立起定标方程, 即可对同一种类及其相似类型的未知样品进行估测。

应用 NIRS 分析技术作为一种定量分析方法, 与化学法

或物理化学法相比, 主要具有如下优点: (1) 无须称样, 可以连续无限次地进行分析; (2) 样品制备简单, 只需粉碎, 不用任何化学试剂处理, 或者根本不用样品制备, 对样品无损耗, 测定后仍可作它用; (3) 测定快速, 只需几秒钟或几分钟即可完成; (4) 所用光学材料便宜; (5) 近红外短波区域的吸光系数小, 穿透性高, 可用透射模式直接分析固体样品; (6) 适用于近红外的光导纤维易得, 利用光纤可实现在线分析和遥测; (7) 高效, 可同时完成多个样品不同化学指标的检测; (8) 环保, 检测过程无污染; (9) 仪器的构造比较简单, 易于维护; (10) 应用广泛, 可不断拓展检测范围。因此, NIRS 分析法也称无损分析法, 已引起化学和分析测试工作者的普遍重视, 许多科学家认为此种技术将成为 21 世纪快速、实时分析和过程控制的先导技术。

2 NIRS 技术在饲草中的应用现状

饲草是畜牧业生产的物质基础, 饲草质量的好坏直接关系到畜产品质量的好坏。控制饲草质量、检测饲草原料的常规成分是饲草生产中非常重要的一环。现行的饲草品质检测普遍采用的是传统的经典分析方法, 这些方法繁琐、测定周

收稿日期: 2007-10-16, 修订日期: 2008-01-18

基金项目: 国家“863”计划项目(2006AA10Z250)资助

作者简介: 任秀珍, 女, 1978 年生, 中国农业大学草地研究所读博士研究生 e-mail: dahaner@126.com

* 通讯联系人 e-mail: wangkun6060@sina.com

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

期长,需对样品进行破坏性处理,要求人员有熟练的操作技术,检测费时、费用昂贵,不能即时得知饲料的营养价值,对生产的指导具有滞后性,严重制约饲草品质的提高,实际工作中应用该法很不方便,在不同程度上限制了饲料质量管理上的快速检验。

NIRS 技术以其高效、成本低、环保无污染等特点,为快速、简便、准确地评定饲草营养价值提供了可能性,还便于对饲草营养价值进行即时监测,指导家畜日粮配制,提高饲喂质量。尽管 NIRS 技术在饲草分析上的应用起步较晚,但越来越被人们所重视。

2.1 常规营养成分分析

测定和分析饲草的常规营养成分是 NIRS 分析技术的传统应用领域,国内外学者利用 NIRS 分析技术在饲草的常规成分分析方面进行了大量的研究,取得了较满意的结果,并已经成为分析测定常规营养成分的标准方法之一。饲草的常规成分主要指水分、干物质(dry matter, DM)、粗蛋白(crude protein, CP)、粗脂肪(ether extracts, EE)、粗灰分(crude ash, CA)、粗纤维(crude fiber, CF)、中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)、酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)和酸性洗涤木质素(acid detergent lignin, ADL)等指标。

1976 年 Norris 等首次利用 NIRS 技术对牧草的粗蛋白进行了测定^[1],其后 Alexandrov 等和 Berardo 测定了苜蓿草的 CP、总氮含量^[2,3],Boever 和 Villamarin 等分析了青贮饲草样品的 CP^[4,5]。Garcia Criado 等用 NIRS 法分析不同生长阶段草地植物的 CP 含量,评价半干旱牧草地饲草的氮含量的相关性,建立了良好的定标模型^[6]。Gislum 等对不同种的高羊茅和黑麦草样品的分析表明,NIRS 技术能很好分析样品的 CP 含量,并指出要想使方程广泛应用于生产,必须每年收集样品,对方程进行纠正^[7]。Hansen 用 NIRS 法测定了枯萎苜蓿草的可溶性蛋白质及氮含量,表明枯萎前比枯萎后可溶性蛋白含量高^[8]。

除蛋白质外,NIRS 技术也先后被用在其他养分的检测上。Thiex 利用 NIRS 测定干草、饲草、饲料玉米中的水分,相关系数高达 0.98,取得了很好的效果^[9]。灰分(Ash)由于不含 H 键,长期以来被认为是不可能用 NIRS 法准确探测。但 Alexandrov 等和 Berardo 用 NIRS 法成功地测定了苜蓿草的 Ash^[2,3];Boever 等对牧场青贮饲料作物中的 Ash 进行了分析测定^[4];Vazquez 等的研究也表明 NIRS 技术可以很好地分析饲草样品中灰分含量,认为这可能是由于灰分与蛋白质等有机物结合在一起的缘故^[10]。此外,饲草中的 CF、NDF、ADF、ADL、DM 指标均可用 NIRS 法测定,但是 ADL 的效果较差^[2,4]。Villamarin 等按品种、茬次和年份收集了西班牙 Galicia 地区的青贮禾草样品,用 NIRS 法对样品的 CP、NDF、ADF、CF 进行了分析,其相关系数(R^2)达 0.9 以上。同时,他认为可以用化学测定值的标准差与方程的预测标准差之比是否大于 3.0($SD/SEV > 3.0$)来作为接受 NIRS 法预测方程的依据^[5]。Waes 等利用 NIRS 技术分析了墨西哥苜蓿的各常规化学成分,取得很好效果^[11]。

我国在 20 世纪 90 年代初也开展了 NIRS 测定饲草各种

成分定标软件的研制,先后完成了饲草中 DM、CD、CF、EE、Ash 等指标的定标工作。吴谨光用 NIRS 成功分析了饲草中的 CP、NDF、ADF 含量^[12]。刘贤等^[13]采用傅里叶近红外漫反射光谱技术,结合偏最小二乘回归法,以 158 个不同种类的秸秆青贮饲料样品建立了常规化学成分和发酵成分含量的近红外定量分析校正模型。其中 CP、NDF、ADF、半纤维素、DM、CA 和 ADL 含量的校正模型决定系数 R^2 都很高,分别为 0.95、0.90、0.86、0.91、0.86、0.95 和 0.90。白琪林等^[14]应用主成分空间和傅里叶变换 NIRS 技术,采用偏最小二乘回归法(PLS),在国内首次建立了适合不同品种类型、不同生长发育时期和不同部位且适配范围广泛的近红外漫反射光谱(NIRS)测定玉米秸秆 NDF 和 ADF 含量的稳定校正模型。赵环环等^[15]用凯氏定 N 法和近红外漫反射光谱法对不同品种、不同熟期、不同地块的黑麦草样品进行了常规粗蛋白含量的对比实验,所测的结果用 NIR 法得到的预测值与用凯氏定 N 法得到的测定值间的复相关系数(R^2)高达 0.99,表明 NIR 作为一种黑麦草粉粗蛋白快速分析的技术是可行的。

以上均是关于 NIRS 测定干燥饲草样品中常规营养成分的报道。应用 NIRS 法对新鲜饲草样品直接分析比较困难,其难度主要是制备均一样品困难和样品中的水分在近红外区的大量吸收会掩盖其它成分的信息^[16]。但随着 NIRS 技术的成熟和样品处理方法的改进,对新鲜饲草料进行近红外分析已成为可能。Park^[17]应用 NIRS 分析了新鲜禾草青贮样品中的 CP、NDF 和 ADF 含量,交叉检验决定系数均大于 0.92,交叉检验标准误分别为 0.25、5.35 和 4.12 $g \cdot kg^{-1}$ 鲜重,说明 NIRS 技术能够较好预测禾草青贮新鲜样品中的这些成分。Cozzolino 等用 NIRS 法分析了 400 种鲜草样品的 DM 和 CP 含量,结果表明 NIRS 法与常规养分分析法相关性良好^[18]。Waters 等用 NIRS 技术分析了新鲜牧草氮的降解性,所得结果是 NIR 数据比化学成分对了解全过程更有意义^[19]。陈鹏飞等^[20]应用偏最小二乘回归法(PLS)、傅里叶变换 NIRS 技术和液氮冷冻制样技术,建立了适合于不同品种、不同生育期、不同茬次和不同青贮方法即时测定青贮苜蓿鲜样中 DM、CP、NDF、ADF 的模型,所建模型的交叉检验决定系数(R_{cv}^2)为 0.8846~0.9898,交叉检验标准误差(RMSECV)为 3.9~9.7 $g \cdot kg^{-1}$ 鲜重。用 50 个样品对模型进行外部检验,其预测相关系数(r)为 0.9397~0.9949,预测标准误差为 1.9~8.3 $g \cdot kg^{-1}$ 鲜重。

但对于结冰和融解的青贮草能否使用 NIRS 技术预测没有相关的报道。在冬季,青贮草的结冰和融解比较常见,为此 Park 等进行了如下实验,共有 19 份青贮禾草样品,每份 1 kg 左右,分为 3 份小样品,其中一份小样品在新鲜状态下被光谱仪扫描。用薄膜包裹样品,部分样品在 20℃ 保存 1 周,然后融化扫描;一部分样品在冻结 3 个月,融化扫描。与此同时一堆样品被冻结 1 周后扫描,而另一堆样品被冻结 3 个月扫描。比较近红外预测的 5 个处理的代谢摄入量、干物质中的酒精量、pH 值、含氮量、干物质中的可消化有机物质(DOM)、NDF、ADF、乳酸和酸总数,发现大多数处理的统计分析差异在 NIRS 内部检验的误差接受范围内^[21]。

2.2 矿物质和微量元素测定

以往快速测定矿物质元素的方法主要是利用原子吸收光谱法和分光光度法等,但是在测定之前要对所分析的样品进行一定的较为复杂的化学处理。由于饲草中的矿物质及元素多是与有机物螯合的,NIRS分析法通过对相关有机物结构的检测,可以实现对饲草中矿物质及各种元素的检测,但这方面的研究较少。1989年,Clark首先用NIRS法分析了高羊茅、冰草、苜蓿三种牧草中Ba, Li, Mo, Ni, Pb, V, Al, S和Si的含量,发现用NIRS法对Al和S的预测效果较好,而在预测其他元素含量时结果较差^[22]。Shenk报道了近红外法测定干草中Ca, P, Mg含量的结果^[23]。Valdes应用NIRS法测定干草、半干草、青贮饲料中的Ca, P, K, Mg的试验表明,NIRS法与化学法测值之间的相关系数为0.02~0.75,变异系数为10.5%~34.5%,效果较差^[24]。2004年,Cozzolino等首次对白三叶和紫花苜蓿两种豆科植物进行了Na, S, Cu, Fe, Mn, Zn和B的测定,结果表明,每千克干物质中定标相关系数和变异系数标准差Na和S分别为0.83(0.8)和0.86(2.5),每千克干物质B, Zn, Mn, Cu和Fe分别为0.80(4.4), 0.80(10.6), 0.78(22.9), 0.76(0.83), 0.57(25.7); S, Na和B的预测标准差分别为5.5, 1.2和4.2,达到了满意的结果^[25]。

2.3 营养价值评定

NIRS技术除了可用于饲草的常规养分分析外,还可结合一些消化代谢实验,建立定标方程,实现饲草的生物学效价评定,从而评定饲草的利用率及营养价值。通过分析饲草组织结构的直接方法和从动物排泄物中预测饲草品质的间接方法,检测饲草中的主要指标,例如粗蛋白、消化率、纤维素、消化能等,来综合评价饲草的营养价值。

国外Norris^[26], Marten^[27], Abrams^[28]等开始研究利用NIRS技术分析牧草品质,所测指标包括粗蛋白(CP)、粗灰分(Ash)、中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤纤维(ADF)和酸性洗涤木质素(ADL)以及体外干物质消化率(IVDMD)等。Givens等对青贮玉米饲料的消化能进行了检测^[29]。McElroy, Ferri等用NIRS预测牧草的CP、ADF、蛋白水解程度、脂肪、Ash、纤维素、P、K、Ca、Mg、Na、NDF、OMD(有机物消化率)、总能项目,证明除了ADL不能用NIR测定外,其他项目均可以使用^[30-33]。Gordon通过NIRS技术预测了未干燥的青贮饲草的摄食量和有机物质的消化能含量^[34]。Coleman用NIRS预测了干草正常消化或消化不良时的波长点,结果用NIRS法所得信息好于化学法^[35]。Windham, Broderick, Btrardo等用NIRS技术成功地测定了牛马饲草的蛋白降解性、ADF和NDF等指标^[36-38]。Guzman用NIRS测定了氨水处理稻草的OMD, CP, NDF, ADF, ADL项目,发现处理前后三者含量无变化,处理后OMD高度负相关(-0.97)^[39]。Lindgren用440份禾本科、豆科及其混合后形成的样品建立代谢能和CP的定标方程,并用从整个瑞典农场收集的621份样品对方程进行纠正,所得方程可以很好地预测牧草的这两种指标,并可用于生产实践^[40]。Park等通过收集136个具有广泛代表性的青贮牧草,建立了测定青贮牧草消化特性的效果良好的NIRS分析方法^[17]。Wilman等

研究了25种青贮禾草、一种豆科青贮牧草、一种全株青贮小麦的细胞壁降解率与NIRS的关系,表明在1430~1620 nm和1960~2230 nm区段,光谱值与细胞壁降解率成正相关,而这两个区域正好是与果胶、淀粉含量成正相关的光谱区;在2230~2400 nm区段,光谱值与细胞壁降解率成负相关,而这一区段又是和木质素含量成正相关的光谱区域。这说明可用NIRS法来对这几类青贮产品的细胞壁降解率进行预测^[41]。另外,Volkers等通过前后4年收集不同生育期、施氮量、土壤特点和不同年份的饲料玉米样品,成功建立了能准确测定玉米净能的NIRS分析法^[42]。

白琪林等^[43]的实验结果表明用NIRS法可快速、准确地测定玉米秸秆的体外干物质消化率(IVDMD), NDF, ADF, CP和EE的含量。聂志东等^[44]应用傅里叶变换近红外(FT-NIR)光谱技术,使用偏最小二乘法成功地建立了国内紫花苜蓿青干草CP, CA, NDF, ADF, ADL以及IVDMD 6项品质指标的预测模型,并对模型进行了交互验证和外部验证。

2.4 抗营养成分检测

饲草中的一些抗营养成分可能是甾类化合物,而另一类被定义为单一化合物。Clark等先后应用NIRS技术测定了有毒植物体内的生物碱含量,发现其决定系数(化学法测值与近红外分析法测值之间的相关系数 r 的平方值)都大于0.9,定标非常成功。原因有:(1)生物碱在植物内存在的范围大;(2)生物碱是一个特别强的近红外吸收者^[45]。Andres等利用近红外技术测定了银合欢中的单宁含量^[46]。Goodchild等建立了测定干草、Vicia和Lathyrus spp. 秸秆中的总酚、总丹宁和浓缩丹宁含量的NIRS预测模型,其中交叉验证标准分析误差(SECV)分别为0.17%, 0.18%和0.23%^[47]。Landau等也成功建立了具有良好相关性($R^2=0.96$)和可接受的准确度(SEP=1.70%)的PEG丹宁(丹宁生物活性评价指标)定标模型^[48]。Windham等用NIRS预测牧草中的“总丹宁酸”含量,结果与用50%甲醇提取法所测结果的相关系数为0.91^[49, 50]。

2.5 其他成分测定

Boever用NIRS分析测定了牧场青贮饲料作物的WSC(可溶性碳水化合物)^[4]。壳多糖水解酶是与高羊茅抗病性有关的酶类,Roberts等用NIRS法与常规化学方法相结合对其建立预测模型,所得方程的相关系数(R^2)达0.9以上,变异系数(CV)小于10%,说明可以用NIRS法来对壳多糖水解酶活性进行测定^[51]。Fairbrother用NIRS法分析了六种冷季型豆科牧草、两种冷季型禾草和四种暖季型禾草的细胞壁碳水化合物(果胶、阿拉伯糖、木糖、葡萄糖)含量。试验中分别用各种草的NIRS信息建立方程,其预测相关系数(R^2)均在0.85以上,但对单一草种的某组分进行预测时,基于混合牧草建标的方程的预测效果没有基于单一草种建标的方程的预测效果好^[52]。沈恒胜等用NIRS法测定稻草中的纤维及硅化物,结果证明Lab值与NIRS值分析的各成分间相关性趋势相同,且NIRS值分析的相关程度略高于Lab值的分析结果^[53]。

2.6 草地植物组成分析

NIRS 技术还可以对草地的植物组成进行分析。Shaffer 用 NIRS 技术分析了苜蓿和黑麦草混合饲草的组成, 认为可以用 NIRS 法代替人工分离法对饲草组成进行分析; 他还对样本大小与建标准确性的关系进行了分析, 认为如果样品选择恰当, 用 5% 的样品建标即可达到用全部样品建标的效果^[54]。Coleman 等的研究表明, NIRS 可以用于检测豆科与禾本科牧草混合物中豆科牧草含量的比例, 还有很多研究将这种做法扩展到了更复杂的人工牧草和天然牧草混合物^[55]。Wachendorf 等分别收集了不同生长阶段、不同肥力状况下、连续两年的红三叶禾草样品, 来检验用 NIRS 技术预测三叶草生物含量的可行性, 结果表明 NIRS 法可以预测牧草的植物组成^[56]。Petersen 用 NIRS 技术很好地预测了高羊茅、白三叶混合牧草中各物种的含量, 并认为通过选择合理的建标样品和光谱区段, 并对光谱信息进行恰当的数学处理, 可以用 NIRS 法预测混合牧草的植物组成^[57]。此外, NIRS 分析技术还可以预测植物的茎叶比例。Alexander 用 NIRS 技术分别分析了蓝茎冰草、地中海匍匐冰草、披碱草的茎叶比例, 结果表明 NIRS 分析值与常规方法分析值之间有较好的相关性, 相关系数分别为 0.73, 0.75 和 0.84, 说明可以用 NIRS 技术很好的预测这些植物的茎叶比例^[58]。Smart 等用 NIRS 预测的几种禾本科草茎叶比的相关系数均大于 0.7, 可以作为快速检测这些禾本科牧草茎叶比的方法^[59]。

3 NIRS 技术在饲草应用中的展望

综上所述, NIRS 分析技术测定的项目已经由常规养分到矿物质及微量元素等非常规成分, 从饲草中单宁、生物碱等有毒成分检测到牧草的茎叶比分析、干物质的体外消化率等生物学效价评定等多个方面。随着电子计算机, 光纤技术

的飞速发展, 实现 NIRS 法的在线分析已成为可能。将 NIRS 技术用于畜禽饲料的实时分析, 合理搭配畜禽日粮组成, 使提高畜禽生产性能成为可能。尽管 NIRS 分析技术在我国饲草分析中尚属起步阶段, 目前在实际应用中还存在一定局限性, 但随着 NIRS 技术的逐步提高, 在我们这样一个畜牧业大国, NIRS 技术定会在饲草分析及草地畜牧业发展中具有广阔的发展前景, 并且会发挥越来越重要的作用。今后应从三个方面进行深入的研究。

3.1 建立完善的饲草模型数据库

充分利用全国饲料质量检验系统网络和样品资源, 集中具有丰富经验的专家和研究人員, 建立不同种类、不同产地、不同配方及不同饲草原料的定标模型, 并建立相应的 NIRS 快速检测标准。通过现代网络技术, 实现资源共享, 同时根据实际情况对定标模型进行有效升级, 提高其检测精度, 以推进 NIRS 分析技术在饲草检测分析中的广泛应用。

3.2 发展在线检测技术, 并与网络技术相结合

在线检测是及时解决生产中质量问题的最有效途径, 随着光纤纤维及传感技术的发展, 实现在线检测已成为可能; 同时将近红外技术和网络技术相结合, 不仅可实现异地定标、异地检测及资源共享, 同时可准确并快速地获得各个区域内的饲草质量状况。

3.3 研制开发价廉实用的 NIRS 仪

目前我国使用的 NIRS 仪绝大多数为进口产品, 价格昂贵, 制约了 NIRS 法在饲草分析检测中的普遍应用。因此, 今后应加强对价廉实用 NIRS 仪的研制开发工作, 推进 NIRS 法在饲草分析中的应用, 如中国石油化工研究院的袁洪福等人提出采用固定光路, CCD 器件作检测器的技术路线, 研制出样机并成功地应用于炼油过程的质量监控, 这项技术已取得国家专利, 值得我们很好的借鉴。

参 考 文 献

- [1] Norris K H. Journal of Animal Science, 1976, 43: 4.
- [2] Alexandrov A N, Atanassova S L, Peltekova V D, et al. Proceedings 7th International Symposium, Vale de Santarem, Portugal. EAAP Publication, 1995, (81): 133.
- [3] Berardo N. Grass and Forage Science, 1997, 52(1): 27.
- [4] Boever J L De, Cottyn B G, Brabander D L De, et al. Animal Feed Science and Technology, 1997, 66(1~4): 211.
- [5] Villamarin B, Fernandez E, Mendez J. Journal of AOAC International, 2002, 85(3): 541.
- [6] Garcia Criado B, Garcia Ciudad A. Journal of the Science of Food Agriculture, 1990, 50: 479.
- [7] Gislum R, Micklander E, Nielsen J P. Field Crops Research, 2004, 88: 269.
- [8] Hansen J L, Viands D R, Steffens J C, et al. Crop Science, 1992, 32(4): 879.
- [9] Thiex Ni, Erem T van, Van Eren T. Journal of AOAC International, 1999, 82(4): 799.
- [10] Vazquez de Aldana B R, Garcia Criado B, Garcia Ciudad A, et al. Commun. Soil Science Plant Analysis, 1996, 27: 795.
- [11] Waes C, Carlier L, Kirilov A, et al. Rastenievni Nauki, 1998, 35(9): 708.
- [12] WU Jir guang(吴瑾光主编). Modern Fourier Transform Infrared Spectroscopy Technology and Application(近代傅里叶变换红外光谱技术及应用). Beijing: Literature Press of Science and Technology Press(北京: 科学技术文献出版社), 1994.
- [13] LIU Xian, HAN Lur jia(刘 贤, 韩鲁佳). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(11): 2016.
- [14] BAI Qi lin, CHEN Shao jiang, DONG Xiao ling, et al(白淇林, 陈绍江, 董晓玲, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2004, 24(11): 1345.
- [15] ZHAO Huan huan, HU Yu er gao, ZHAO Qi bo(赵环环, 胡跃高, 赵其波). Acta Zoonutrim enta Sinica(动物营养学报), 2001, 13(4): 40.

- [16] Reeves J B, Blosser T H. J. Dairy Science, 1989, 72: 79.
- [17] Park R S, Agnew R E, Gordon F J, et al. Animal Feed Science and Technology, 1998, 72: 155.
- [18] Cozzolino D, Labandera M. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2002, 82: 380.
- [19] Waters C J, Givens D I. Animal Feed Science and Technology, 1992, 38(4): 335.
- [20] CHEN Peng-fei, RONG Yur-ping, HAN Jiar-guo, et al(陈鹏飞, 戎郁萍, 韩建国, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(7): 1304.
- [21] Park R S, Agnew R E, Kilpatrick D J, et al. Animal Feed Science and Technology, 2002, 109(1~2): 151.
- [22] Clark D H, Cary E E, Mayland H F. Agronomy Journal, 1989, 81(1): 91.
- [23] Shenk J S, Westerhaus M O, Hoover M R. J. Dairy Science, 1979, 62: 807.
- [24] Valdes E V, Young L G, Leeson S, et al. Poultry Science, 1985, 65(3): 753.
- [25] Cozzolino D, Moron A. Animal Feed Science and Technology, 2004, 111: 161.
- [26] Norris K H, Barnes R F, Moore J E, et al. Journal of Animal Science, 1976, 43: 889.
- [27] Marten G C, Brink D R, Halgerson J L, et al. Crop Science, 1984, 24: 1179.
- [28] Abrams S M, Shenk J S, Westerhaus M O, et al. Journal of Dairy Science, 1987, 70: 806.
- [29] Givens D I, De Boever J L, Deaville E R. Nutrition Research Review, 1997, 10: 83.
- [30] McElroy A R, Hope H J, Vera D M. Forage Notes, 1991, 35: 31.
- [31] Ferri D, Convertini G, et al. Annali Dell'Istituto Sperimentale Agronomico, 1991, 22: 67.
- [32] Terramoccia S, Casoli C. Use of Marginal Land of Wild Ungulate Production. Bologna, Italy, Proceedings of the 10th National Congress. Scientific Association of Animal Production, 1993. 31.
- [33] Dorgeloh W G. African Journal of Ecology, 1999, 37(2): 168.
- [34] Gordon F J, Coopre K M, Park R S, et al. Animal Feed Science Technology. 1998, 70: 339.
- [35] Coleman S W, Murray I. Animal Feed Science and Technology, 1993, 44(3~4): 237.
- [36] Windham W R, Barton F E. Association of Official Analytical Chemists, 1991, 74(2): 324.
- [37] Broderick G A, Fahey G C Jr. Forage Quality, Evaluation and Utilization, 1994, 200.
- [38] Btrardo N, Settineri D, Bergoglio G, et al. NIRS Prediction of Ruminant Degradability of the NDF and ADF of a Wide Range of Raw Materials in Cattle and Buffalo: First Results. Bologna, Italy, Proceedings of the 10th National Congress. Scientific Association of Animal Production, 1993. 55.
- [39] Guzman J L, Garrido A, et al. Animal Feed Science and Technology, 1996, 57(1~2): 149.
- [40] Lindgren E. Swedish Journal of Agricultural Research(Sweden), 1988, 18(1): 21.
- [41] Wilman D, Field M. Animal Feed Science and Technology, 2000, 88: 139.
- [42] Volkers K C, Wachendorf M. Animal Feed Science and Technology, 2003, 109: 183.
- [43] BAI Qi-lin, CHEN Shao-jiang, YAN Yarr-lu, et al(白淇林, 陈绍江, 严衍禄, 等). Scientia Agricultura Sinica(中国农业科学), 2006, 39(7): 1346.
- [44] NIE Zhi-dong, HAN Jiar-guo, YU Zhu, et al(聂志东, 韩建国, 玉柱, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(7): 1308.
- [45] Clark D H, Ralphs M H, Lamb R C. Agron. J., 1987, 79(3): 481.
- [46] Andrés S, Calleja A, López S, et al. Animal Feed Science and Technology, 2005, 123: 487.
- [47] Goodchild A V, Haremei F J, Moneim A, et al. Infrared Spectroscopy, 1998, (6): 175.
- [48] Landau S, Dvash L, Decandia M, et al. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(4): 638.
- [49] Windham W R, Fales S L, Hoveland C S. Crop Sci., 1988, 28: 705.
- [50] Roberts C A, Beuselinck P R, Ellersieck M R, et al. Crop Sci., 1993, 33: 675.
- [51] Roberts C A, Marek S M, Lei W, et al. Crop Science, 1994, 34(4): 1070.
- [52] Fairbrother T E, Brink G E. Animal Feed Science and Technology, 1990, 28: 293.
- [53] SHEN Heng-sheng, CHEN Jurr-chen, ZHONG Zang-wen, et al(沈恒胜, 陈君琛, 种藏文, 等). Scientia Agricultura Sinica(中国农业科学), 2003, 36(9): 1086.
- [54] Shaffer J A. Agronomy Journal, 1990, 82(4): 669.
- [55] Coleman S W, Christiansen S, Shenk J S. Crop Sci., 1990, 30: 202.
- [56] Wachendorf M, Ingwersen B, Taube F. Grass and Forage Science, 1999, 54: 87.
- [57] Petersen J C, Barton F E. Crop Science, 1987, 27: 1077.
- [58] Alexander J. American Society of Agronomy, 2004, 94: 316.
- [59] Smart A J, Schacht W H, Moser L E, et al. Agronomy J., 2004, 96: 316.

Application and Prospect of Near Infrared Reflectance Spectroscopy in Forage Analysis

REN Xir zhen^{1,3}, GUO Hong ru³, JIA Yu shan², GE Ge r tu², WANG Kun^{*}

1. Institute of Grassland Science, China Agricultural University, Beijing 100094, China

2. College of Ecology and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China

3. Inner Mongolia University for the Nationalities, Tongliao 028042, China

Abstract Forage was the material basis of animal husbandry production, and its quality is directly related to the quality of animal products. It was very important to control the forage quality and detect the composition of forage raw materials in forage production. Predication of forage quality was often completed by the traditional and classical methods in the past, which were complex, time consuming and expensive, and could not acquire the nutritional value of forage timely. Near infrared reflectance spectroscopy was a highly efficient and rapid modern analysis technique developed in 1970s. It comprehensively applied the latest research results of computer technique, spectroscopy and chemometrics, and has been widely used in various fields owing to its unique advantages such as being timely, less expensive, non-destructive, and so on. Near infrared reflectance spectroscopy has gained more and more importance though its application to forage analysis was very late. Presently, not only conventional composition (such as moisture, dry matter, crude protein, crude fiber, crude fat, crude ash, neutral detergent fiber, acid detergent fiber, etc.), but also non-conventional composition (including minerals, trace elements, enzyme and anti-nutritional factors etc.) and anti-nutritional factors in forage were determined by means of near infrared reflectance spectroscopy. Testing and analyzing the conventional composition in forage was the traditional applied field of near infrared reflectance spectroscopy, a lot of studies of which were done and it has already been one of the standard methods of testing the conventional composition. Forage bioavailability was also evaluated by near infrared reflectance spectroscopy, so as to assess the utilization rate and nutritional value of forage. Moreover, near infrared spectroscopy could be used successfully to predict the botanical composition in grassland and leaf/stem ratios. Near infrared spectroscopy technique and its application and prospect in forage analysis were reviewed in the present paper.

Keywords Near infrared spectroscopy; Forage analysis; Application; Prospect

(Received Oct. 16, 2007; accepted Jan. 18, 2008)

* Corresponding author