

引用格式:

李杰, 李蒙, 傅童成, 徐强, 肖晶, 易自力, 王晓玉. 基于近红外光谱技术的南荻生物质品质快速分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(2): 113–119.

LI J, LI M, FU T C, XU Q, XIAO J, YI Z L, WANG X Y. Rapid analysis of biomass feedstock quality of *Miscanthus lutarioriparius* using near-infrared spectroscopy[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(2): 113–119.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 基于近红外光谱技术的南荻生物质品质快速分析

李杰<sup>1,2,3</sup>, 李蒙<sup>1,3</sup>, 傅童成<sup>1,3</sup>, 徐强<sup>1,3</sup>, 肖晶<sup>1,3</sup>, 易自力<sup>1,3</sup>, 王晓玉<sup>2,3\*</sup>

(1.湖南农业大学生物科学技术学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南省农业信息与工程研究所, 湖南 长沙 410125; 3.国家能源非粮生物质原料研发中心湖南分中心, 湖南 长沙 410128)

**摘要:** 为快速分析洞庭湖南荻的生物质品质(可溶物、纤维素、半纤维素、木质素、灰分含量和纤维素结晶度、聚合度), 以采集的 126 份种质资源为材料, 分别采用 2 种光谱预处理方法和 3 种特征光谱筛选方法优化原始光谱, 基于不同组合方式优化光谱及原始光谱, 结合偏最小二乘法构建近红外光谱分析模型, 筛选针对 7 个品质指标的双重优化模型, 基于灰色关联度法对 126 份种质资源进行工业化潜力评估。结果表明: 洞庭湖南荻可溶物、纤维素、半纤维素、木质素、灰分含量及纤维素结晶度、聚合度均存在丰富的多样性, 且大致呈正态分布, 符合近红外建模的要求; 基于直接差分法(DD)结合竞争性自适应重加权算法(CARS)优化的 PLS 模型对南荻可溶物含量的预测结果表现优异, 其校正集的均方根误差(RMSEC)为 0.27, 决定系数( $R^2$ )为 0.99; 交叉验证集的均方根误差(RMSECV)为 0.77, 决定系数( $R^2_{cv}$ )为 0.97, 预测集的相对分析误差为 5.07, 相关系数( $R^2_v$ )为 0.88; 基于 DD 结合变量组合集群分析混合迭代保留信息变量(VCPA-IRIV)优化的 PLS 模型在南荻的纤维素、半纤维素、木质素、灰分含量和结晶度、聚合度的预测中表现优异, 模型的 RMSEC 为 0.14~10.20,  $R^2_c$  为 0.98~0.99, RMSECV 为 0.28~19.46,  $R^2_{cv}$  为 0.94~0.98,  $R^2_v$  为 0.87~0.98, 相对分析误差(RPD)为 4.84~15.65; 表明基于双重优化光谱子集建立的近红外光谱模型能较好地预测南荻的生物质品质, 且具有较高的稳定性; 通过灰色关联度法对 126 份南荻种质资源进行评估, 发现 126 个样本的工业化利用潜力分数大致呈正态分布, 其利用潜力分数的均值为 54.4, 一级种质资源 4 个, 二级种质资源 40 个, 三级种质资源 63 个, 四级种质资源 14 个, 五级种质资源 5 个。

**关键词:** 南荻; 生物质品质; 近红外光谱技术; 灰色关联度法

中图分类号: Q949.71+4.2; O657.33

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)02-0113-07

## Rapid analysis of biomass feedstock quality of *Miscanthus lutarioriparius* using near-infrared spectroscopy

LI Jie<sup>1,2,3</sup>, LI Meng<sup>1,3</sup>, FU Tongcheng<sup>1,3</sup>, XU Qiang<sup>1,3</sup>, XIAO Jing<sup>1,3</sup>, YI Zili<sup>1,3</sup>, WANG Xiaoyu<sup>2,3\*</sup>

(1.College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Hunan Institute of Agricultural Information and Engineering, Changsha, Hunan 410125, China; 3.Hunan Branch, National Energy R&D Center for Non-food Biomass, Changsha, Hunan 410128, China)

**Abstract:** To rapidly analyze the biomass quality(soluble matter, cellulose, hemicellulose, lignin, and ash content, as well as cellulose crystallinity and polymerization) of *Miscanthus lutarioriparius* in Dongting Lake, 126 germplasm resources were collected using two spectral pre-processing methods and three characteristic spectral screening methods. Using

收稿日期: 2023-07-26

修回日期: 2024-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(32000260); 博士后科学基金(2020M682566); 湖南省农业科技创新资金项目(2022CX84-19)

作者简介: 李杰(1998—), 男, 湖南常德人, 硕士研究生, 主要从事种质资源学及光谱信息应用研究, lj286333@163.com; \*通信作者, 王晓玉, 博士, 副研究员, 主要从事光谱技术应用及农业大数据研究, xiao\_yu\_100@163.com

different combination methods with optimized spectra and original spectra, a near-infrared spectral analysis model was constructed based the partial least squares method. A dual optimization model was selected for seven quality indicators, and the 126 germplasm resources were evaluated for their industrial potential based on the grey correlation degree method. The results showed that the contents of soluble matter, cellulose, hemicellulose, lignin, and ash, as well as the crystallinity and polymerisation of cellulose in *M. lutarioriparius*, Dongting Lake, existed in rich diversity and was normally distributed, which was in line with the requirements of near-infrared modeling. The PLS model optimized based on DD derivation and CARS algorithm performed well in the prediction of soluble matter content in *M. lutarioriparius*, with the root mean square error(RMSEC) of 0.27 and the coefficient of determination( $R^2_c$ ) of 0.99 in the calibration set. The RMSECV of 0.77 and the  $R^2_{cv}$  of 0.97 in the cross-validation set, and the relative analytical error of 5.07 and the  $R^2_v$  of 0.88 in the prediction set. The PLS model optimized by VCPA-IRIV based on DD combined with variable combination cluster analysis exhibits excellent performance in predicting the cellulose, hemicellulose, lignin and ash content of *M. lutarioriparius* and its crystallinity and degree of polymerization. The model's RMSEC ranges from 0.14 to 10.20,  $R^2_c$  from 0.98 to 0.99, RMSECV from 0.28 to 19.46,  $R^2_{cv}$  from 0.94 to 0.98,  $R^2_v$  from 0.87 to 0.98, and the relative percent deviation (RPD) ranges from 4.84 to 15.65. The results also showed that the NIR spectral model based on the dual optimal spectral subset could effectively predict the biomass quality of *M. lutarioriparius* and had high stability. Through the evaluation of 126 germplasm resources of *M. lutarioripariu* by the gray correlation degree method, it was found that the industrial utilization potential scores of the 126 samples were normally distributed, with an average value of 54.4. There were 4 first-grade germplasm resources, 40 second-grade germplasm resources, 63 third-grade germplasm resources, 14 fourth-grade germplasm resources, and 5 fifth-grade germplasm resources.

**Keywords:** *Miscanthus lutarioriparius*; biomass feedstock quality; near-infrared spectroscopy; gray correlation method

南荻(*Miscanthus lutarioriparius*)是中国特有的一类高大禾草,也是洞庭湖区广泛分布的优质生物质资源,每年湖区约产出近  $1 \times 10^6$  t 的生物质,曾为当地造纸业的主要原料来源<sup>[1]</sup>。南荻木质纤维素含量高,加工品质优异,是制备生物基产品的理想原料<sup>[2-3]</sup>。随着 2019 年造纸业在湖区全面退出,南荻产业转型面临着巨大挑战。

发展南荻新产业需要对洞庭湖区的南荻种质资源进行全面评估。南荻种质、栽培方法和收储模式差异均可造成可溶物、纤维素、半纤维素、木质素、灰分含量和纤维素结晶度、聚合度等生物质品质的巨大差异,进而影响其利用方式及加工工艺<sup>[4-5]</sup>;因此,需构建一套快速、准确、高通量的原料及种质资源评价系统,以满足洞庭湖区南荻产业发展的需求。

近红外光谱技术是一项可靠的高通量分析技术,被广泛应用于种子质量检测、土壤样品检测等领域<sup>[6-9]</sup>。李晓娜等<sup>[6]</sup>采集 129 份能源植物样品(7 份奇岗、53 份南荻、44 份荻和 25 份芒),利用近红外光谱技术对样品茎秆和叶片中的纤维素、半纤维素、木质素和灰分含量进行了快速定量分析,能够对未知样品进行较好的预测,但其灰分含量的预测在茎秆和叶片中都不甚理想,还需进一步优化。陈晓玲<sup>[10]</sup>采集了来自 4 个国家的 223 份芒属植物茎秆样品,并采用 PLS、非线性最小

二乘支持向量机(LS-SVM)和径向基函数神经网络(RBF-NN)构建了纤维素、半纤维素和木质素含量的预测模型,结果表明模型可以用于芒属植物的生物质成分含量的预测。

当前,利用近红外光谱技术对木质纤维素类生物质原料品质进行快速分析的实践较少,针对南荻的相关研究更是鲜有报道<sup>[10-11]</sup>。鉴于此,笔者基于近红外光谱技术,以 126 份南荻种质资源为研究对象,结合光谱预处理和特征光谱筛选优化法建立 PLS 多元校正模型,期待实现对洞庭湖区南荻种质资源进行绿色、无损、高效评价,为南荻优良品种选育和推动洞庭湖区产业转型提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试 126 份野生南荻种质资源采自湖南省环洞庭湖区,地上部样品(茎、叶)在 70 °C 条件下烘至绝干,根据 NB/T 34057.1—2017 方法进行前处理,装于自封袋中密封保存。

### 1.2 南荻生物质品质测定的项目与方法

南荻生物质中可溶物、纤维素、半纤维素、木质素、灰分含量按照 NB/T 10767—2021、NB/T 34057.5—2017 和 NB/T 34057.6—2017 进行表征;

纤维素结晶度根据 NB/T 11255—2023 表征；纤维素聚合度根据 NB/T 11250—2023 表征。

### 1.3 南荻近红外光谱数据的采集及处理方法

取 20 g 粉末样品装入圆形石英杯中压平压实，采用威斯派克公司生产的近红外光谱仪 G3000 获取样品的近红外光谱(NIRS)数据。扫描前，将光谱仪开机预热 1 h。进行南荻样品 NIRS 采集时，扫描模式为积分球漫反射，波段范围设置为 900~2 500 nm，分辨率为 8 cm<sup>-1</sup>，扫描 16 次，结果取平均值。

使用 ChemDataSolution3.0(大连达硕信息技术有限公司)对 NIRS 数据进行直接差分法(DD)求导和 Savitzky-Golay 卷积(SG)求导，随后采用 Matlab R2022a 对求导后的 NIRS 数据通过竞争性自适应重加权算法(CARS)、变量组合集分析混合遗传算法(VCPA-GA)和变量组合集分析混合迭代保留信息变量(VCPA-IRIV)进行特征光谱筛选，将优化后的光谱子集通过光谱-理化值共生距离算法 SPXY 划分校正集和预测集，通过偏小二乘法建立校正模型，并采用留一法对所建模型进行交叉验证。采用误差均方根(RMSE)、决定系数( $R^2$ )和相对分析误差(RPD)等评价指标对所建模型性能进行评价。一个优良的近红外模型应该具有较小的 RMSE、较大的  $R^2$ ，且 RPD $\geq 2$ 。

本研究中，采用 DD 求导和 SG 求导 2 种光谱预处理方法以及 CARS、VCPA-GA 和 VCPA-IRIV 光谱特征筛选算法对原始光谱进行优化，通过 SPXY 按照 3 : 1 划分校正集和预测集，且每个指标都使用原始光谱的全波段建立模型作为比照。

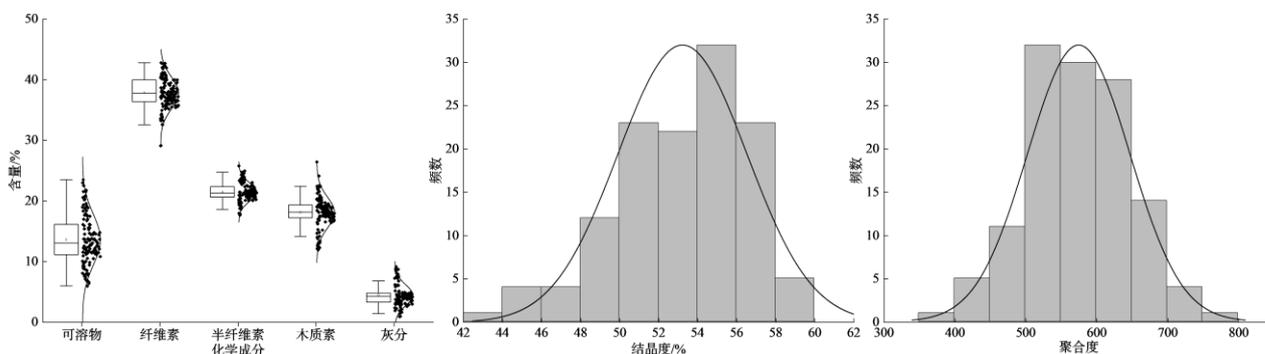


图 1 洞庭湖区南荻生物质品质指标分布

Fig.1 Distribution of biomass feedstock quality of *Miscanthus lutarioriparius* in Dongting Lake

## 2.2 南荻样品的近红外光谱模型

### 2.2.1 南荻的近红外光谱

如图 2 所示，供试样本 NIRS 测试范围在

## 1.4 基于灰色关联度法的指标数据分级

选取可溶物、纤维素、半纤维素、木质素、灰分含量和纤维素结晶度、聚合度等工业品质指标通过灰色关联度方法来计算 126 份洞庭湖南荻样品工业化利用潜力分数。通过矩阵计算的方式来量化不同关系水平的指标，按照可溶物、灰分含量越小越好和纤维素、半纤维素、木质素、结晶度和聚合度越大越好的原则将 7 个指标转化为 1 个指标，即工业化利用潜力分数。为满足实际工业生产需求，将样品群体的工业化利用潜力分数划分为 5 个等级，按一级(潜力分数 $\geq 80$ )、二级( $60 \leq$ 潜力分数 $< 80$ )、三级( $40 \leq$ 潜力分数 $< 60$ )、四级( $20 \leq$ 潜力分数 $< 40$ )、五级(潜力分数 $< 20$ )排列。

## 2 结果与分析

### 2.1 南荻的生物物质品质

如图 1 所示，126 份南荻生物质品质指标分布范围较为广泛，大致上呈正态分布。其中，可溶物含量为 5.99%~23.54%，纤维素含量为 29.11%~42.79%，半纤维素含量为 17.65%~25.78%，木质素含量为 11.92%~26.43%，灰分含量为 0.16%~9.14%，纤维素结晶度为 43.22%~59.80%，纤维素聚合度为 390~785。说明洞庭湖区南荻生物质主要有效成分含量高，纤维结构致密，工业化利用潜质优于一般农作物秸秆，是优质的生物质产品工业原料。同时，种质资源群体内主要化学成分含量及物理特征存在明显差异，说明样品具有充足的代表性，适合用于建立近红外光谱模型。

900~2 500 nm，强吸收峰均出现在 1 400~2 500 nm 的范围内，该波长范围内主要反映南荻生物质中含氢化合物分子振动的倍频和频率组合特征，可用于分析生物质主要化学成分含量及其物理特征。

以往研究表明, 1 919、1 171、1 471~1 563、1 586~1 597、2 092~2 101、2 265~2 277、2 328~2 336、2 486~2 491 nm 是对纤维素和半纤维素含量进行预

测的关键光谱区域<sup>[12-13]</sup>。另外, 1 677、1 811、2 328~2 332、2 375、2 488 nm 处被鉴定为与木质素相关的重要区域<sup>[13-14]</sup>。本研究中, 供试样品 NIRS 在上述范围内都具有较强的吸收峰, 且不同样品的吸收峰的吸收度值有所差异。可见, 供试样本符合近红外光谱模型建模的要求。

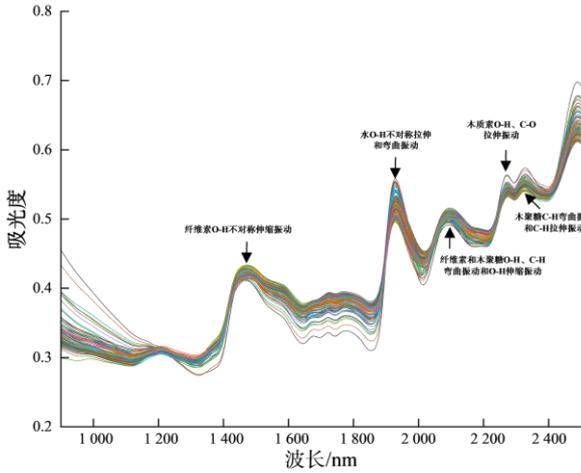


图2 南荻供试样品近红外光谱

Fig.2 Near-infrared spectra of test samples of *Miscanthus lutarioriparius*

### 2.2.2 南荻生物质品质模型的建立与优化

针对 126 份南荻生物质材料的 7 个品质指标, 结合全光谱、CARS、VCPA-GA、VCPA-IRIV、SG-CARS、SG-VCPA-GA、SG-VCPA-IRIV、DD-CARS、DD-VCPA-IRIV 和 DD-VCPA-GA 等 10 种光谱优化组合在校正集上共构建 70 个近红外分析模型(图 3)。从图 3 可以看出, 单独通过光谱预处理或特征光谱筛选方法优化近红外光谱均可提高模型的性能, 但经双重优化后的模型性能更加优异。

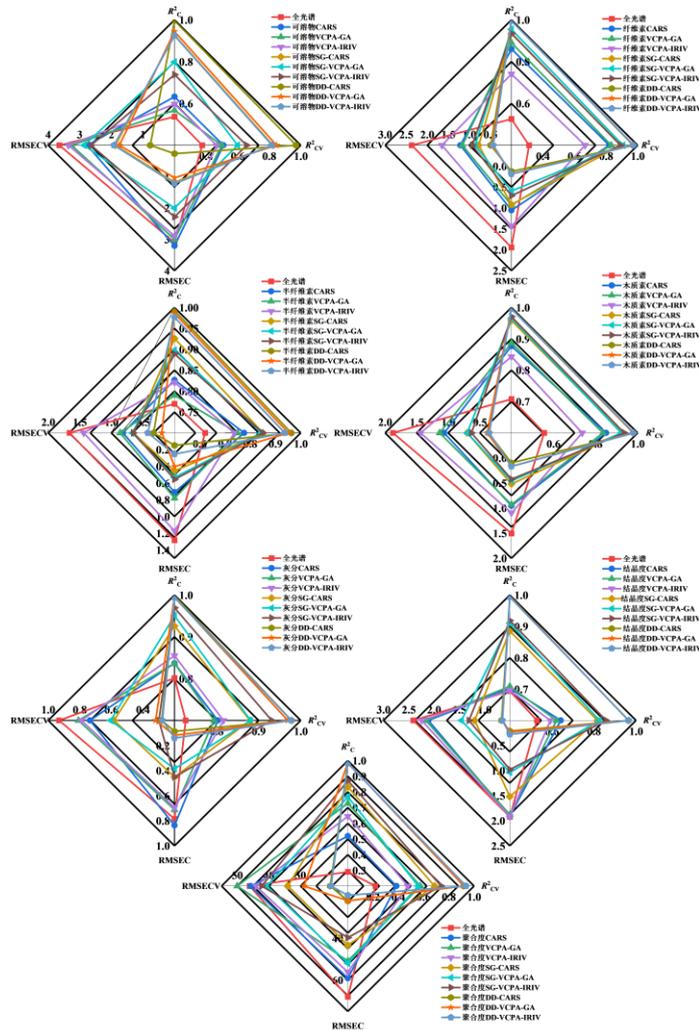


图3 PLS 模型模型性能对比

Fig.3 The performance of PLS models

基于 DD 求导, 结合 CARS、VCPA-GA 和 VCPA-IRIV 特征光谱筛选算法的双重优化模型相对于全光谱模型, 其  $R^2_c$  从 0.29~0.80 提升到了 0.52~0.99, RMSEC 从 0.93~64.08 降低至 0.09~51.74, 表明这 3 种算法能够从谱带重叠严重的近红外光谱数据中成功提取与目标品质相关的光谱变量, 从而提升模型的性能。

从表 1 可知, 基于 DD-CARS 双重优化的可溶物近红外光谱预测模型表现最好, 其校正集的

均方根误差(RMSEC)为 0.27, 决定系数( $R^2_c$ )为 0.99; 交叉验证集的均方根误差(RMSECV)为 0.77, 决定系数( $R^2_{cv}$ )为 0.97; 预测集的相对分析误差为 5.07, 决定系数( $R^2_v$ )为 0.88。而南荻样品中纤维素、半纤维素、木质素、灰分含量和结晶度、聚合度大小的最优近红外模型都是基于 DD-VCPA-IRIV 构建的,  $R^2_c$  值均大于 0.97,  $R^2_{cv}$  值均大于 0.93, 表明本研究建立的近红外光谱分析技术可较精确地定量分析洞庭湖南荻的生物质品质。

表 1 南荻样品的生物质品质最优模型性能参数

**Table 1 Optimal model performance parameters for physicochemical properties of *Miscanthus lutarioriparius* samples**

| 生物质品质 | 主因子数 | 预处理 | 特征筛选      | 变量数 | $R^2_c$ | $R^2_{cv}$ | RMSEC | RMSECV |
|-------|------|-----|-----------|-----|---------|------------|-------|--------|
| 可溶物   | 11   | DD  | CARS      | 84  | 0.99    | 0.97       | 0.27  | 0.77   |
| 纤维素   | 11   | DD  | VCPA-IRIV | 83  | 0.99    | 0.98       | 0.19  | 0.43   |
| 半纤维素  | 8    | DD  | VCPA-IRIV | 84  | 0.98    | 0.94       | 0.25  | 0.42   |
| 木质素   | 10   | DD  | VCPA-IRIV | 78  | 0.99    | 0.98       | 0.17  | 0.35   |
| 灰分    | 10   | DD  | VCPA-IRIV | 76  | 0.99    | 0.98       | 0.14  | 0.28   |
| 结晶度   | 11   | DD  | VCPA-IRIV | 76  | 0.99    | 0.97       | 0.28  | 0.65   |
| 聚合度   | 9    | DD  | VCPA-RIV  | 69  | 0.98    | 0.94       | 10.20 | 19.46  |

2.2.3 南荻生物质品质模型的评价

利用各指标最优模型对预测集的 32 个样品的可溶物、纤维素、半纤维素、木质素、灰分含量

及结晶度、聚合度的大小进行定量预测, 并与其实际测值进行相关分析, 从而对模型的稳定性进行校验。由图 4 可知, 可溶物含量和聚合度预测值

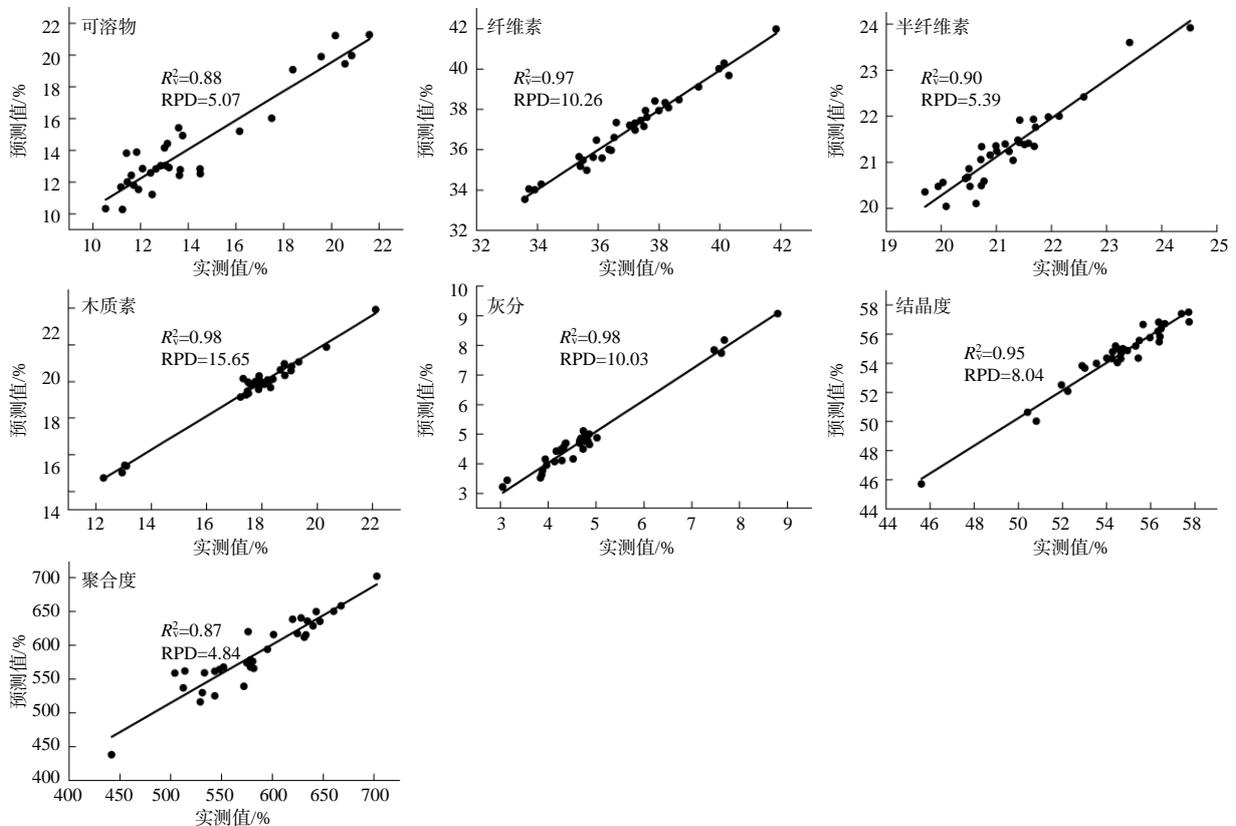


图 4 预测集南荻生物质品质实测值与预测值的线性回归分析结果

Fig.4 Linear regression plot of actual and predicted values for biomass feedstock quality of *Miscanthus lutarioriparius*

与实测值的  $R^2$  分别为 0.88 和 0.87, RPD 分别为 5.07 和 4.84, 纤维素、半纤维素、木质素、灰分和结晶度  $R^2$  分别为 0.97、0.90、0.98、0.98、0.95, RPD 分别为 10.26、5.39、15.65、10.03、8.04。表明基于双重优化光谱子集建立的近红外光谱模型能较好地预测南荻的生物物质品质, 且具有较高的稳定性。

### 2.3 基于灰色关联度分析的洞庭湖南荻种质资源快速评价

如图 5 所示, 126 个样本的工业化利用潜力分数大致呈正态分布, 其利用潜力分数均值为 54.4, 其中, 一级种质资源 4 个, 二级种质资源 40 个, 三级种质资源 63 个, 四级种质资源 14 个, 五级种质资源 5 个。可见, 进一步加强对洞庭湖南荻野生种质资源的保护和育种工作十分必要。

表 2 列出了 4 个一级样品的生物物质品质和工业化利用潜力分数。从表 2 可以看出, 通过灰色关联度法筛选出的 4 个洞庭湖南荻一级样品都有

较低的可溶物含量和灰分含量, 具有较高的纤维素、半纤维素、木质素含量和结晶度、聚合度。表明通过灰色关联度法评估生物物质的工业潜力是可行的。

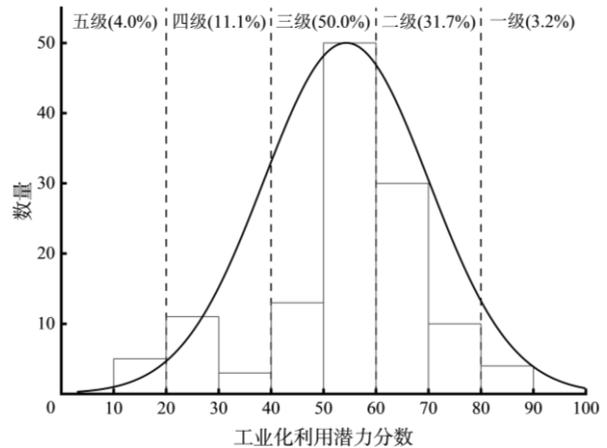


图 5 供试样品工业化利用潜力分数的分布

Fig.5 Distribution of energy utilization potential score for tested samples

表 2 南荻理想原料的生物物质品质

Table 2 Biomass feedstock quality of ideal germplasm resources

| 样品编号      | 可溶物/% | 纤维素/% | 半纤维素/% | 木质素/% | 灰分/% | 结晶度/% | 聚合度   | 原料质量分数/% | 原料质量等级 |
|-----------|-------|-------|--------|-------|------|-------|-------|----------|--------|
| 210129-15 | 8.0   | 40.2  | 24.2   | 21.8  | 1.4  | 49.3  | 717.4 | 84.9     | 一级     |
| 210130-2  | 6.0   | 39.6  | 21.3   | 21.3  | 1.0  | 51.1  | 580.3 | 84.3     | 一级     |
| 210128-9  | 8.6   | 41.2  | 23.1   | 20.3  | 1.0  | 48.3  | 633.0 | 80.7     | 一级     |
| 210128-15 | 7.9   | 36.5  | 21.0   | 26.4  | 1.9  | 47.9  | 580.4 | 80.1     | 一级     |

### 3 结论与讨论

本研究采集了126份洞庭湖南荻样品, 结合不同光谱预处理方式以及不同特征光谱选择算法对南荻光谱进行优化, 随后采用SPXY方法划分校正集与预测集, 通过偏最小二乘法建立了南荻可溶物、纤维素、半纤维素、木质素、灰分、结晶度和聚合度等生物物质品质的预测模型, 发现基于DD-CARS优化的模型在预测可溶物含量方面具有最好的表现, 其预测集的 $R^2$ 和RPD分别为0.88和5.07。在纤维素、半纤维素、木质素、灰分、结晶度、聚合度的预测模型中, 基于DD-VCPA-IRIV优化的PLS模型表现最好, 其预测集的 $R^2$ 均大于0.87, RPD均大于4.84。表明利用近红外光谱技术可对南荻的生物物质品质进行快速、精准地预测。但由于南荻在来源、收获方式和收获季节等存在差异, 导致无法使用国内外现有的近红外分析模

型预测本区域的南荻生物物质品质, 必须建立一套适合地域特点或企业的预测模型<sup>[15]</sup>。

本研究的可溶物含量的预测结果不理想, 可能是由于样品在采集后没有进行清洗所致, 数据分析中没有剔除异常值进行优化, 异常值剔除方法在近红外模型性能提升方面的作用还有待进一步研究。此外, 本研究还采用灰色关联度法对126份材料进行了工业化潜力评估, 结果显示, 126份南荻的工业化潜力分数的均值为54.4, 一级种质资源4个, 二级种质资源40个, 三级种质资源63个, 四级种质资源14个, 五级种质资源5个。其中4个一级种质资源都具有极低的可溶物和灰分含量, 极高的纤维素、半纤维素、木质素含量和结晶度、聚合度, 工业化利用潜力极高, 是进行工业生产的理想原料。但南荻种质资源中一半的等级都位于三级, 可见加强对洞庭湖南荻种质资源的

保护和基因改良十分必要。

#### 参考文献:

- [1] XU Q, WU S L, FU T C, et al. Unlocking the potential of Dongting Lake-grown *Miscanthus lutarioriparius* biomass: a comprehensive quality analysis and bioproduct application study[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 896: 165276.
- [2] 薛帅, 易自力, 黄红梅, 等. 洞庭湖“芦苇”产业发展面临的困境及对策分析[J]. *环境生态学*, 2022, 4(4): 33–38.
- [3] 易自力. 芒属能源植物资源的开发与利用[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2012, 38(5): 455–463.
- [4] SOOMRO A, CHEN S Y, MA S W, et al. Elucidation of syngas composition from catalytic steam gasification of lignin, cellulose, actual and simulated biomasses[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2018, 115: 210–222.
- [5] VITELLI M, MEHRTASH H, ASSATORY A, et al. Rapid and non-destructive determination of protein and starch content in agricultural powders using near-infrared and fluorescence spectroscopy, and data fusion[J]. *Powder Technology*, 2021, 381: 620–631.
- [6] 李晓娜, 范希峰, 武菊英, 等. 纤维素类芒属草本能源植物品质近红外光谱快速检测技术研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(1): 64–69.
- [7] 王永, 杨国耀, 乔俊峰, 等. 便携式近红外光谱仪及其在农业中的应用现状[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(7): 10–17.
- [8] 王冬, 王坤, 吴静珠, 等. 基于光谱及成像技术的种子品质无损速测研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(1): 52–59.
- [9] 刘红梅, 肖正午, 申涛, 等. 稻米直链淀粉含量近红外检测模型的建立[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 45(2): 189–193.
- [10] 陈晓玲. 基于近红外光谱技术的芒草木质纤维素含量测定方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [11] HAFFNER F B, MITCHELL V D, ARUNDALE R A. Compositional analysis of *Miscanthus giganteus* by near infrared spectroscopy[J]. *Issues & Studies*, 2013, 20: 1629–1637.
- [12] GUIMARÃES C C, SIMEONE M L F, PARRELLA R A C, et al. Use of NIRS to predict composition and bioethanol yield from cell wall structural components of sweet sorghum biomass[J]. *Microchemical Journal*, 2014, 117: 194–201.
- [13] SCHWANNINGER M, RODRIGUES J C, FACKLER K. A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2011, 19(5): 287–308.
- [14] LI M, WANG J, DU F, et al. High-throughput analysis of chemical components and theoretical ethanol yield of dedicated bioenergy sorghum using dual-optimized partial least squares calibration models[J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2017, 10: 206.
- [15] 纳嵘, 任晋东, 胡波, 等. 基于不同预处理方法建立苜蓿营养成分近红外快速分析模型的研究[J]. *家畜生态学报*, 2021, 42(12): 37–43.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳正