doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.030

近红外光谱多核并行谱区选择任务调度策略研究

黄　华[1]　朱　洁[1]　刘广昊[1]　吴习宇[2]　祝诗平[1]

(1.西南大学工程技术学院，重庆 400716；2.西南大学食品科学学院，重庆 400716)

摘要：在近红外光谱的谱区选择算法中，滑动窗口偏最小二乘法具有较高的预测精度，但是其程序运行时间很长。在不改变算法预测精度的前提下，首先以分段间隔偏最小二乘法为基础研究了顺序分配法、等间距法和排序法等 3 种任务调度策略对并行算法性能的影响。在这 3 种任务调度策略中，排序法具有较好的负载均衡性和较高的并行效率。然后在 16 核云计算平台下将排序法分配策略分别应用于组合分段偏最小二乘法、反向分段偏最小二乘法和滑动窗口偏最小二乘法等谱区的并行选择算法中。经实验测试，在单核串行算法下反向分段偏最小二乘法和滑动窗口偏最小二乘法的程序运行时间分别为 9.22 h 和 55.51 h，在排序法分配策略下采用 2 核并行算法时其程序运行时间分别缩短为 4.98 h 和 29.03 h，分别节省了 45.99% 和 47.70% 的程序运行时间。实验结果表明：当考虑并行效率和计算成本时，在 1 ~ 16 核的并行算法中，选用 2 核并行执行以上 4 种谱区选择算法都具有最高的并行效率和性价比。

关键词：近红外光谱；谱区选择；多核并行算法；任务调度策略

中图分类号：O657.33；TP301.6　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2018)10-0270-05

Task Scheduling Strategies of Parallel Near Infrared Spectral Region Selection on Multi Core and Its Application

HUANG Hua[1]　ZHU Jie[1]　LIU Guanghao[1]　WU Xiyu[2]　ZHU Shiping[1]

(1. *College of Engineering and Technology*, *Southwest University*, *Chongqing* 400716, *China*

2. *College of Food Science and Technology*, *Southwest University*, *Chongqing* 400716, *China*)

Abstract: The moving window partial least squares (mwPLS) has higher prediction accuracy in the wavelength selection of near infrared spectroscopy, but the runtime of mwPLS is very long on single core serial algorithm. In order to reduce running time for wavelength selection, the task scheduling strategies on multi core were investigated. Taking interval partial least squares (iPLS) as example on the premise of not changing the prediction accuracy of the serial algorithm, the sequential distribution algorithm (SDA), equal space allocation algorithm (ESAA) and sorting allocation algorithm (SAA) were presented to study the effect of task scheduling strategy on the performance of parallel algorithm. The SAA had the best load balance and the highest parallel efficiency among the three task scheduling strategies. Then, based on the 16 cores cloud computing platform, the SAA was applied to the parallel wavelength selection algorithm of synergy interval partial least squares (siPLS), backward interval partial least squares (biPLS) and mwPLS. Comparing with single core serial algorithm, two cores parallel wavelength selection of biPLS and mwPLS with SAA reduced the runtime from 9.22 h and 55.51 h to 4.98 h and 29.03 h, and totally 45.99% and 47.70% runtime of biPLS and mwPLS were saved, respectively. The experimental results showed that when considering the parallel efficiency and computational cost condition, the two cores parallel algorithm for the four spectral region selection algorithms had the highest parallel efficiency and cost performance among the 1 ~ 16 core parallel algorithm.

Key words: near infrared spectroscopy; wavelength selection; multi core parallel algorithm; task scheduling strategies

---

收稿日期：2018-04-28　修回日期：2018-05-21

基金项目：国家自然科学基金项目(31771670、31071319)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(XDJK2017C080)和西南大学博士基金项目(SWU116044)

作者简介：黄华(1981—)，男，讲师，主要从事近红外与高光谱数据分析研究，E-mail：hh317991@126.com

通信作者：祝诗平(1969—)，男，教授，主要从事近红外与高光谱数据分析研究，E-mail：zspswu@126.com

0　引言

近红外光谱(Near infrared spectroscopy, NIRS)广泛应用于稻谷、小麦和玉米等农产品的含水率无损检测中[1-3]。在近红外光谱定量分析模型中偏最小二乘法(Partial least squares, PLS)[4]应用最为广泛。从原始光谱数据中选择特征谱区用于 PLS 建模有利于提高预测模型的精度。常用的谱区选择算法[5-6]有 4 种：分段间隔偏最小二乘法(Interval partial least squares, iPLS)[7-9]、组合分段偏最小二乘法(Synergy interval partial least squares, siPLS)[10]、反向分段偏最小二乘法(Backward interval partial least squares, biPLS)[11]、滑动窗口偏最小二乘法(Moving window partial least squares, mwPLS)[12-14]。黄华等[9]研究表明这 4 种特征谱区选择算法中 mwPLS 和 biPLS 算法预测精度较高，但其程序运行的时间都较长。如果从提高单核芯片的速度来缩短谱区选择程序运行时间，存在两方面问题[15]：①热量问题，会使芯片产生的热量超过处理器所能承受的极限。②性价比问题，速度快的处理器，其价格都很高、导致单核处理器的性价比很低。因此目前主要采用多核芯片并行执行来缩短程序运行时间。

本文以近红外光谱法定量分析稻谷含水率为例，在 16 核的云计算平台下，首先分析顺序分配法、等间距法和排序法等 3 种任务调度策略对并行 iPLS 算法性能的影响；然后将并行性能最好的任务调度策略应用到 siPLS、biPLS 和 mwPLS 等并行算法中，分析它们的相对加速比、并行算法的效率和负载均衡等性能指标。

1　实验材料

1.1　光谱数据

利用 Bruker MPA 型近红外光谱仪采集 364 份稻谷样品光谱。工作波数范围为 3 598.71 ~ 12 493.30 cm^{-1}，扫描次数 32 次，分辨率为 3.85 cm^{-1}，共 2 307 个波数点。随机选取其中的 210 个样品作为校正集；154 个样品作为预测集。

1.2　云平台配置及并行性能参数

云计算服务器配置如下：处理器 Intel Xeon E5-2650 v3，主频 2.30 GHz、CPU 核数 16 核、内存 16 GB，操作系统 Microsoft Windows Server 2012 R2 Datacenter Version 6.3 (Build 9600)，所用软件为 Matlab 8.5 (R2015a)。

为了衡量并行算法性能，通常使用相对加速比、并行算法的效率和负载平衡等性能指标[15-16]。

相对加速比为

$$S_P(n)=\frac{t_1(n)}{t_P(n)} \tag{1}$$

式中　$t_1(n)$——单核运行时间

$t_P(n)$——多核运行时间

一般情况下，$t_1(n)>t_P(n)$。

并行算法的效率为

$$E_P(n)=\frac{S_P(n)}{p} \tag{2}$$

式中　p——处理器核数

$S_P(n)\leqslant p$，所以有 $0<E_P(n)\leqslant 1$。

并行算法的负载均衡百分比为

$$\eta_P=\frac{\sum_{i=0}^{p-1}T_i}{\max T_i p}\times 100\% \tag{3}$$

式中　T_i——第 i 个进程执行时间

2　单核串行 iPLS 算法效率分析

2.1　单核串行 iPLS 算法计算复杂度分析

分段间隔偏最小二乘法(iPLS)首先将原始光谱波数分成 2 ~ N 段，取每一小段分别用于最小二乘法(PLS)建模，并计算其预测集的均方根误差(Root mean square error of prediction, RMSEP)，然后根据 RMSEP 最小的原则统计计算结果，从分段中选取具有最佳预测性能的光谱区域。iPLS 算法计算复杂度参照文献[9]。iPLS 谱区选择示意图如图 1 所示。

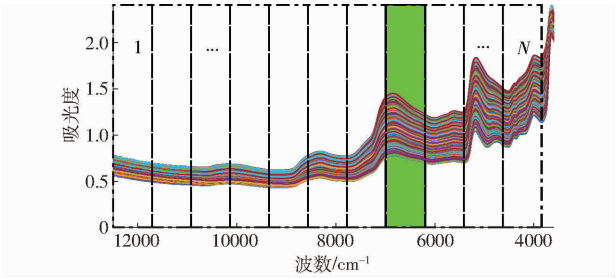

图 1　iPLS 谱区选择示意图

Fig. 1　Diagram of iPLS wavelength selection

2.2　单核串行 iPLS 算法运行结果分析

在云计算平台下采用传统的单核串行程序运行 iPLS 算法。程序连续运行 10 次，计算每种分段情况下 iPLS 算法的平均程序运行时间，如图 2 所示。

由图 2 可以看出，iPLS 程序的运行时间与分段数和光谱数据量有关。当分段数为 2 和 3 时程序的运行时间较长，这主要是因为这两种分段情况下用于单次 PLS 建模的数据量较大。如分段数为 2 时，将 2 307 个波数点分成两段，每一段有 1 153 个波数点用于 PLS 建模。随着分段数的增加程序运行时

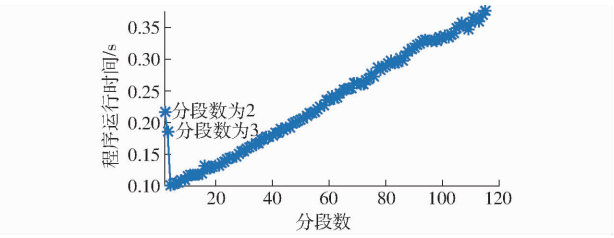

图 2 单核串行 iPLS 算法程序运行时间

Fig. 2 Runtime of iPLS serial algorithms on signal core

间呈上升趋势,这主要是由于分段数越多程序运行 PLS 算法的次数越多。在单核下 iPLS 串行算法程序平均运行总的时间为 26.80 s。

3 云计算平台下多核并行 iPLS 算法任务调度策略

3.1 基于 parfor 关键字的多核任务调度策略

在多核处理器下实现特征谱区选择的并行算法流程如图 3 所示。

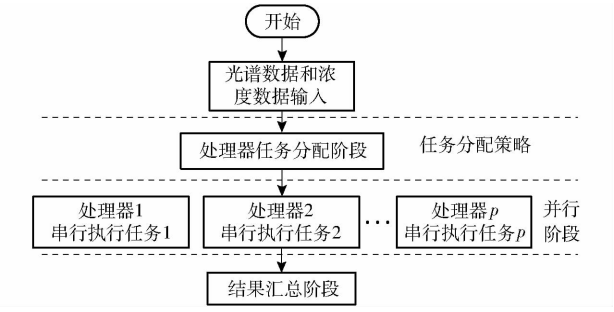

图 3 近红外光谱谱区选择算法并行化流程

Fig. 3 Flow chart for parallel wavelength selection

由于 iPLS 算法具有分离性,即可以根据各分段数单独调用 PLS 算法,因此可以将串行的 iPLS 谱区选择算法转换成并行算法在多核计算机中运行。在图 3 中,将串行的算法分配到各个处理器上并行执行,关键的问题是如何对各个处理器进行合理的任务分配,使各个处理器的负载平衡,减少各处理器的开销时间和处理器间的通信时间,从而提高并行效率。

在单核串行算法中,运行 iPLS 程序会根据分段数调用各自的 iPLS 算法,即

for $i=2:N$ 分段数为 2 ~ N 段

iPLS(i) 根据分段数调用 iPLS 算法

end

在 Matlab 中提供了 parfor 关键字实现将串行的 for 循环转换为并行执行[17-18],for 关键字改为 parfor 即可实现并行算法。

Matlab 中 parfor 采用 client 和 worker 模式,如图 4 所示。

在多核处理中,其中一个核为 client 端,其余的多个核为 worker 端。在 client 端编写和启动并行代

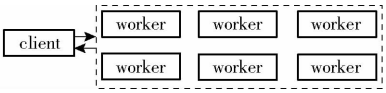

图 4 Matlab 并行计算资源池

Fig. 4 Matlab parallel computing resource pool

码,Matlab 的串行部分程序代码在 client 端运行,在程序的执行过程中 client 端根据并行代码的关键字 parfor 寻找需要并行执行的代码,并将这部分代码分配到各个 worker 端,然后各个 worker 端并行执行,并将计算结果返回给 client 端。若计算机的核数为 p(即有 p 个 worker 端),循环次数为 n,若 n/p 为整数,则循环将会被均匀分配;如果 n/p 不为整数,则各个 worker 端的任务分配将会不均匀。本文分析比较了 3 种任务调度策略对并行性能的影响。

(1) 顺序分配法任务调度策略

顺序分配法任务调度策略将按自然数的顺序为各个核平均分配任务。例如在 4 核处理器上运行 n 为 1 ~ 115 段的 iPLS 程序($n=1$ 表示用全谱建模,为了与全谱进行比较,n 的最小值取为 1),1 ~ 115 段被顺序平均分成 4 组:第 1 组为第 1 ~ 28 段;第 2 组为第 29 ~ 56 段;第 3 组为第 57 ~ 84 段;第 4 组为第 85 ~ 115 段。client 端将这 4 组分段数据随机分配给 4 个核处理器并行执行。

(2)等间距法任务分配调度策略

等间距法任务分配调度策略以处理器核数 p 为间隔值为每一个核从分段数中抽取分段数索引。例如在 4 核处理器上运行 n 为 1 ~ 115 的 iPLS 程序,以 4 间隔将 1 ~ 115 段分成 4 组:第 1 组为 1、5、…、113 段;第 2 组为 2、6、…、114 段,第 3 组为 3、7、…、115 段,第 4 组为 4、8、…、112 段。然后将这 4 组随机分配给 4 核处理器并行执行。

(3)排序法分配调度策略

排序法分配策略会根据各个核任务执行的进程来分配任务,任务先完成的核将首先获得下一次执行任务。任务分配按由重到轻的原则进行。同样以在 4 核处理器上运行 1 ~ 115 共 115 段的 iPLS 程序为例。第 1 次分配首先将 115 乘以 2/3 除以核数 4,即 $115\times2/12=19.16$,取整为 20。空闲的前一半核首先获得 20 段的计算任务。以此类推继续给空闲的核分配任务,直到所有的任务被分配完。

3.2 多核并行 iPLS 算法运行结果分析

在 16 核云计算平台下,分别对顺序分配法、等间距法、排序法等 3 种任务调度策略并行计算性能进行测试。在 Matlab 中通过 parpool 关键字设置 CPU 核数分别为 1 ~ 16 等 16 种情况下运行 iPLS 算法。这 3 种任务分配策略的程序运行时间、相对加速比、并行效率和负载均衡情况如图 5、6 所示。

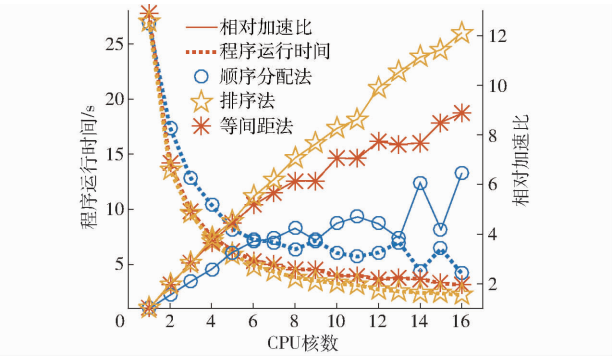

图 5　3 种分配策略程序运行时间与相对加速比

Fig. 5　Runtime and speedup ratio for three task scheduling strategies

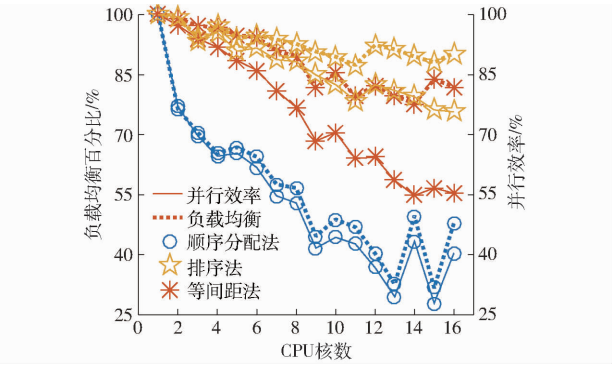

图 6　3 种分配策略并行效率和负载均衡比较

Fig. 6　Parallel efficiency and load balance for three task scheduling strategies

由图 5 可见，随着并行核数的增加程序运行时间成比例减少，相对加速比呈上升趋势。排序法分配策略的相对加速比性能最佳。由图 6 可见，顺序分配法负载均衡性能最差。以 4 核并行 iPLS 算法为例，由图 2 可见，当 N 大于 3 以后随着分段数的增加计算 iPLS 程序的运行时间增大。在 4 核处理器上实验测试结果表明：在顺序分配法中程序运行时间最长为 9.75 s，最短时间为 3.47 s，最快的核有 64.50% 的空闲时间用于等待最慢的核完成任务。由图 6 可见，随着并行核数的增加负载均衡性能和并行效率都呈下降趋势。

综上所述，在以上 3 种分配策略中，排序法分配策略并行性能最佳，后文将排序法分配策略应用到组合分段偏最小二乘法、滑动窗口偏最小二乘法和反向分段偏最小二乘法等 3 种谱区选择并行算法中。

4　在云计算平台下多核并行谱区选择算法应用

4.1　siPLS 算法多核并行运行结果

组合分段偏最小二乘法（siPLS）[9,12] 是在分段间隔法的基础上，从分段中取出 L 段组合成一个新的光谱数据集，用于 PLS 建模；然后根据 RMSEP 最小的原则确定最佳组合光谱区域。

在 16 核云计算平台下采用排序法分配策略，siPLS 算法的运行结果如表 1 所示。

表 1　在 1～16 核下 siPLS 并行算法运行结果

Tab. 1　Result of siPLS parallel algorithm from 1 to 16 cores

参数	核数					
	1	2	4	8	10	16
运行时间/min	20.70	10.84	5.74	3.06	2.54	1.95
相对加速比	1.00	1.91	3.60	6.75	8.15	10.60
并行效率/%	100	95.45	90.10	84.43	81.53	88.29
负载均衡百分比/%	100	95.31	90.28	84.85	80.48	83.42

从表 1 可见，利用 2 核并行运行 siPLS 算法时相对加速比为 1.91，程序运行时间由单核的 20.70 min 缩短至 10.84 min，节省了 47.83% 的程序运行时间。从 2～16 核的并行运行结果来看，随着核数的增加程序运行时间进一步减小。并行效率和负载均衡性能随着并行核数的变化有一定的波动，核数为 2 时并行效率最高，为 95.45%，负载均衡性能也最佳，达到 95.31%。11 核并行时并行效率最低，为 77.98%，负载均衡性能也最差，百分比为 80.03%。

4.2　biPLS 算法多核并行运行结果

反向分段偏最小二乘法（biPLS）[9] 首先将原始光谱的波数分成 n 段，然后去掉其中的任意一段，得到由 $n-1$ 段光谱组合成的新光谱数据集，用于 PLS 建模；计算其在不同主成分数下的 RMSEP，再对保存下来 $n-1$ 段光谱数据重复上述进程，直到最后只剩下 1 段光谱为止。最后根据 RMSEP 最小的原则确定最佳组合光谱区域。

在 16 核云计算平台下采用排序法分配策略，biPLS 算法的运行结果如表 2 所示。

表 2　在 1～16 核下 biPLS 并行算法运行结果

Tab. 2　Result of biPLS parallel algorithm from 1 to 16 cores

参数	核数					
	1	2	4	8	10	16
运行时间/h	9.22	4.98	2.80	1.98	2.00	1.80
相对加速比	1.00	1.85	3.30	4.67	4.60	5.13
并行效率/%	100	92.64	82.45	58.33	46.01	32.07
负载均衡百分比/%	100	93.25	91.76	88.62	85.14	91.51

从表 2 可见，利用 2 核并行运行 biPLS 算法时相对加速比为 1.85，程序运行时间由单核的 9.22 h 缩短至 4.98 h，节省了 45.99% 的程序运行时间。从 2～16 核的并行运行结果来看，随着核数的增加

程序运行时间进一步减小。然而并行效率随着并行核数的增加却减少,2 核并行时并行效率最高,为 92.64%。2~16 核的负载均衡性都能较好,百分比均介于 85% ~94% 之间。

4.3 mwPLS 算法多核并行运行结果

滑动窗口偏最小二乘法(mwPLS)[19-20]是以某一点为中心,按一定的窗口长度从原始光谱中取出一段连续的光谱数据集,用于最小二乘法建模;然后根据 RMSEP 最小的原则确定最佳光谱中心点和窗口长度,从而获得最佳特征光谱区域。

在 16 核云计算平台下采用排序法分配策略,mwPLS 算法的运行结果如表 3 所示。

表 3 在 1~16 核下 mwPLS 并行算法运行结果

Tab. 3 Result of mwPLS parallel algorithm from 1 to 16 cores

参数	核数					
	1	2	4	8	10	16
运行时间/h	55.51	29.03	16.20	12.44	11.36	10.92
相对加速比	1.00	1.91	3.43	4.46	4.89	5.08
并行效率/%	100	95.62	85.68	55.78	48.89	31.77
负载均衡百分比/%	100	98.45	94.39	94.93	96.12	96.30

从表 3 可见,利用 2 核并行运行 mwPLS 算法时相对加速比为 1.91,程序运行时间由单核的 55.51 h 缩短至 29.03 h,节省了 47.70% 的程序运行时间。从 2~16 核的并行运行结果来看,2 核并行时并行效率最高,为 95.62%。负载均衡百分比均大于 94%。

5 结束语

在近红外光谱分析中偏最小二乘法获得了广泛的应用。从全部光谱中选择最佳特征谱区可以提高 PLS 算法的预测精度,目前广泛使用的谱区选择算法有 mwPLS、biPLS、siPLS、iPLS 等 4 种。在单机单核下这 4 种算法程序的运行时间分别为 55.51 h、9.22 h、20.70 min、26.80 s。在不改变算法精度的情况下,在云计算平台下采用排序任务分配策略多核并行算法有较好的负载均衡性能,可以缩短程序的运行时间,提高近红外光谱谱区选择效率。如采用 2 核并行时,mwPLS 和 biPLS 算法分别节省了 47.70% 和 45.99% 的程序运行时间。随着核数的增加,程序运行时间会进一步减小,但并行效率不与核数成正比,从 2~16 核的并行运行结果来看,2 核并行算法具有最高的并行效率。目前普通的计算机至少具有 2 核处理器,在考虑并行效率和计算成本条件下,利用 2 核并行计算具有经济性和实用性。

参 考 文 献

1 HEMAN A, HSIEH C L. Measurement of moisture content for rough rice by visible and near-infrared (NIR) spectroscopy[J]. Engineering in Agriculture Environment & Food, 2016, 9(3): 280-290.

2 PEIRIS K H S, DONG Y, DAVIS M A, et al. Estimation of the deoxynivalenol and moisture contents of bulk wheat grain samples by FT-NIR spectroscopy[J]. Cereal Chemistry, 2017, 94(4): 677-682.

3 FERRARI M, MOTTOLA L, QUARESIMA V. Principles, techniques, and limitations of near infrared spectroscopy[J]. Canadian Journal of Applied Physiology, 2004, 29(4): 463-487.

4 CHENG J H, SUN D W. Partial least squares regression (PLSR) applied to NIR and HSI spectral data modeling to predict chemical properties of fish muscle[J]. Food Engineering Reviews, 2017, 9(1): 36-49.

5 NATALIA S, ELEUTERIO A, BORTOLATO S A, et al. Visible/near infrared-partial least-squares analysis of Brix in sugar cane juice: a test field for variable selection methods[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2010, 102(2): 100-109.

6 MEHMOOD T, LILAND K H, SNIPEN L, et al. A review of variable selection methods in partial least squares regression[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2012, 118: 62-69.

7 DIESEL K M F, COSTA F S L D, PIMENTA A S, et al. Near-infrared spectroscopy and wavelength selection for estimating basic density in *Mimosa tenuiflora* [Willd.] Poiret wood[J]. Wood Science & Technology, 2014, 48(5): 949-959.

8 SAUDLAND A, WAGNER J, NIELSEN J P, et al. Interval partial least-squares regression (iPLS): a comparative chemometric study with an example from near-infrared spectroscopy[J]. Applied Spectroscopy, 2000, 54(3): 413-419.

9 黄华,吴习宇,祝诗平. 近红外光谱预测稻谷水分含量特征谱区选择及其效率分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2018,38(4): 1071-1075.
HUANG Hua, WU Xiyu, ZHU Shiping. The feature wavelengths selection and efficiency analysis for paddy moisture content prediction by near infrared spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018,38(4):1071-1075. (in Chinese)

10 CHEN Q, ZHAO J, LIU M, et al. Determination of total polyphenols content in green tea using FT-NIR spectroscopy and different PLS algorithms[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2008, 46(3): 568-573.

11 LEARDI R, NØRGAARD L. Sequential application of backward interval partial least squares and genetic algorithms for the selection of relevant spectral regions[J]. Journal of Chemometrics, 2004, 18(11): 486-497.

12 GOODARZI M, SAEYS W. Selection of the most informative near infrared spectroscopy wavebands for continuous glucose monitoring in human serum[J]. Talanta, 2016, 146: 155-165.

(下转第 283 页)

13 KANG M Z, REFFLE P D, AUCLAIR D, et al. Analytical study of a stochastic plant growth model: application to the GreenLab model[J]. Mathematics & Computers in Simulation, 2008, 78(1): 57-75.

14 MA Y, CHEN Y, ZHU J, et al. Coupling individual kernel-filling processes with source-sink interactions into GREENLAB-Maize[J]. Global Change Biology, 2018,121(5):961-973.

15 徐照丽，孙艳，吴茜，等. 烟草功能-结构模型 GreenLab-Tobacco 的构建[J]. 中国烟草学报，2016，22(3)：52-59.
XU Zhaoli, SUN Yan, WU Qian, et al. Construction of the functional and structural model GreenLab-Tobacco for tobacco[J]. Chinese Journal of China Tobacco, 2016, 22(3): 52-59. (in Chinese)

16 WANG Feng, KANG Mengzhen, LU Qi, et al. Calibration of topological development in the procedure of parametric identification: application of the stochastic GreenLab model for *Pinus sylvestris* var. mongolica[J]. International Symposium on Plant Growth Modeling,2010, 26(5): 26-33.

17 王炳忠. 第一讲太阳能中天文参数的计算[J]. 太阳能，1999(2):8-10.
WANG Bingzhong. The first lecture: calculation of astronomical parameters in solar energy [J]. Solar Energy, 1999(2): 8-10. (in Chinese)

18 左大康，弓冉. 中国太阳直接辐射、散射辐射和太阳总辐射间的关系[J]. 地理学报，1962,29(3)：175-186.
ZUO Dakang, GONG Ran. Relationship among direct solar radiation, scattered radiation and total solar radiation in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1962,29(3): 175-186. (in Chinese)

19 聂修和，聂宜茂. 光合有效辐射测量原理及其单位换算[J]. 山东农业大学学报(自然科学版)，1992，23(3)：247-253.
NIE Xiuhe, NIE Yimao. Photosynthesis effective radiation measurement principle and unit conversion[J]. Journal of Shandong Agricultural University(Natural Sciences), 1992, 23(3): 247-253. (in Chinese)

20 LEUNING R. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C3 plants[J]. Plant, Cell and Environment, 1995,18: 339-355.

21 FARQUHAR G D, CAEMMERER S, BERRY J A. A biochemical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C3 species[J]. Planta, 1980, 149(1): 78-90.

22 张小全，徐德应. 杉木中龄林不同部位和叶龄针叶光合特性的日变化和季节变化 [J]. 林业科学，2000,36(3)：19-26.
ZHANG Xiaoquan, XU Deying. Diurnal and seasonal changes of photosynthetic characteristics of different positions and leaf-aged needles of middle-aged Chinese fir plantation[J]. Forestry Science, 2000,36(3): 19-26. (in Chinese)

23 俞新妥. 杉木栽培学[M]. 福州：福建科学技术出版社，1997：394-398.

24 张佳华，姚凤梅. 陆面模式的植物叶光合生理的数值模拟试验及分析[J]. 气象科学，2007，27(4)：419-424.
ZHANG Jiahua, YAO Fengmei. Numerical simulation experiment and analysis of photosynthetic physiology of plant leaves with land surface model[J]. Meteorological Science, 2007, 27(4): 419-424. (in Chinese)

(上接第 274 页)

13 JIANG J H, BERRY R J, SIESLER H W, et al. Wavelength interval selection in multicomponent spectral analysis by moving window partial least-squares regression with applications to mid-infrared and near-infrared spectroscopic data[J]. Analytical Chemistry, 2002, 74(14): 3555-3565.

14 PAN T, LIU J, CHEN J, et al. Rapid determination of preliminary thalassaemia screening indicators based on near-infrared spectroscopy with wavelength selection stability[J]. Analytical Methods, 2013, 5(17): 4355-4362.

15 陈国良，孙广中，徐云，等. 并行计算的一体化研究现状与发展趋势[J]. 科学通报，2009,54(8):1043-1049.
CHEN Guoliang, SUN Guangzhong, XU Yun, et al. Integrated research of parallel computing: status and future[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(8): 1043-1049. (in Chinese)

16 XIA J, YANG Y W, CAO H X, et al. Visible-near infrared spectrum-based classification of apple chilling injury on cloud computing platform[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2018, 145: 27-34.

17 黄华，祝诗平，刘碧贞. 近红外光谱云计算分析系统构架与实现[J/OL]. 农业机械学报，2014，45(8):294-298,327. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140847&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.047.
HUANG Hua, ZHU Shiping, LIU Bizhen. Architecture and implementation of NIR analysis system based on cloud computing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8):294-298,327. (in Chinese)

18 SHARMA G, MARTIN J. Matlab: a language for parallel computing[J]. International Journal of Parallel Programming, 2009, 37(1): 3-36.

19 KASEMSUMRAN S, KEERATINIJAKAL V, THANAPASE W, et al. Near infrared quantitative analysis of total curcuminoids in rhizomes of curcuma longa by moving window partial least squares regression[J]. Journal Near Infrared Spectroscopy, 2010, 18(4):263-269.

20 LIU J, CHEN D S, SHEN J F. Development of self-validating soft sensors using fast moving window partial least squares[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 49(22):11530-11546.