

GCOM-C Leaf Spectral Property Product  
Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)  
ver. 11.12

Hibiki NODA, Takeshi MOTOHKA, Kazutaka MURAKAMI  
and Kenlo Nishida NASAHARA

GCOM PI#102

16 Dec. 2011

Version policy: 2 digits for year and 2 digits for month, separated by a dot. For example, ver. 11.09 means it was completed on September (month 09), 2011

## PRIMULAS ver.11.12 における変更点

### 1. phenological stage についてのミスの修正

PRIMULAS ver.11.09・11.10 では、phenological stage の計算を GRASS で行う際、各年の出力値を、すべて 2000 年の気象データを使用した計算結果にしてしまうというミスを犯していたため、指定した年の気象データに基づく phenological stage が正しく出されていなかった。Ver.11.12 では、1982年から2002年までの気象データに基づく phenological stage を出すように修正を行った。

### 2. vegetation type “Srubs and bare ground” における出力データのミスの訂正

本来、“LSP\_TKY\_LF\_2010\_0802\_Qc\_sun.txt” のデータを出力すべきところを、ver.11.09 および ver.11.10 では誤って“LSP\_QHB\_LF\_2010\_0802\_Qc\_sun.txt”としてしまっており、データが出力されない状態になっていたため、これを修正した。

### 3. 波長 1600-2500 nm のデータの追加 (“deciduous broad leaf” and “crop” のみ)

PRIMULAS の出力値は実測された個葉の分光特性であるが、測定に使用した積分球光源の性質上、1600 nm より長い波長については測定できていなかった。Ver.11.12 では、“deciduous broad leaf” and “crop” のみではあるが、個葉の分光特性モデル PROSPECT から分光反射率・透過率を推定し、実測値 (350-1600 nm) とモデル推定値 (1600-2500 nm) を組合せた 350-2500 nm の分光反射率・透過率を出力値とした。

## Algorithm Outline

PRIMULAS (Plant Reflectance/transmittance Induce ModUle for LAnd Surface observation) は、全球の任意の緯度・経度における、任意の年・DOY での、優占する植物の葉やその他の部位の分光特性 (反射率または透過率) を出力するモデルである。PRIMULAS ver. 11.10 では、個葉の分光反射率・透過率を出力する。

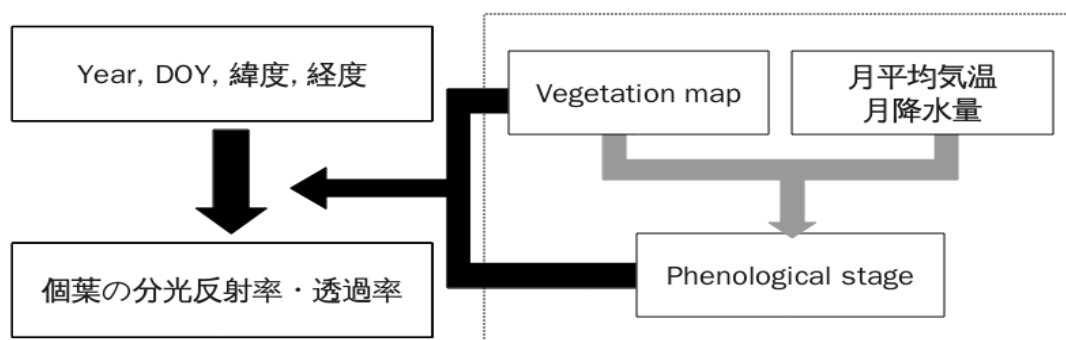


図1. PRIMULAS における個葉の分光反射率・透過率推定のフローチャート

個葉の分光反射率・透過率は、その植物の functional type によって大きく異なる。また、一般に葉はその phenological stage に応じて、含水率、クロロフィル・カロテノイドなどの色素含量、LMA (leaf mass area) などに変化する (図 2)。これらの生化学的な特性の違いは、葉の分光反射率および透過率に大きく影響するとされる (Jacquemoud and Baret 1990)。実際、個葉の分光反射率・透過率も大きく季節変化する (図 2)。そこで PRIMULAS ver.11.12 では、全球の植生分類マップに基づき、それぞれの植生タイプにおいて優占している種について、個葉の phenological な変化を考慮した個葉の分光特性を出力する。

PRIMULAS ver.11.12 での空間分解能は緯度／経度1度メッシュであり、時間分解能は monthly である。

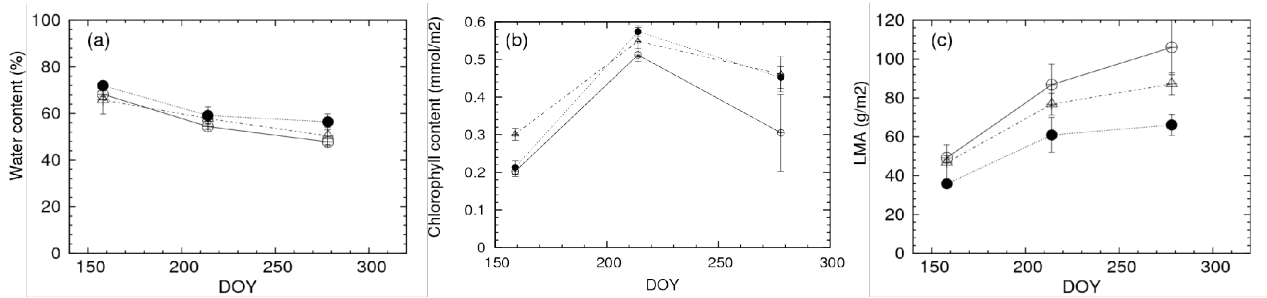


図 2. 高山サイト(落葉広葉樹林)における落葉広葉樹の含水率(a)、クロロフィル含量(b)、LMA(c)の季節変化。異なるシンボルは異なる樹種／葉のタイプを示している(○, ミズナラ陽葉; ●, ミズナラ陰葉; △, ダケカンバ)。それぞれ3枚の葉について測定した値の平均値と標準偏差を示す。

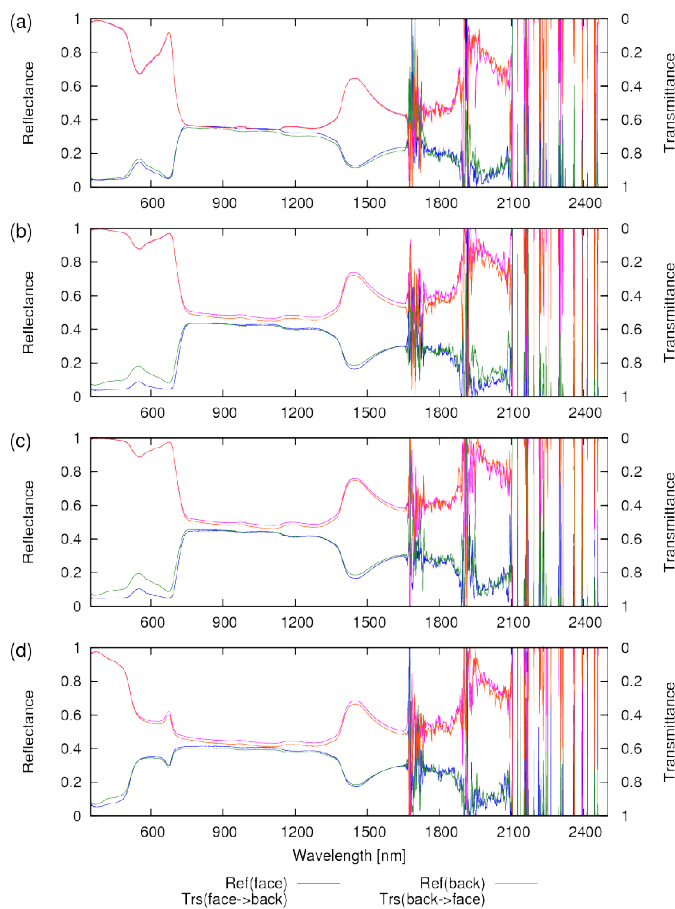


図 3. 高山サイトにおけるミズナラ陽葉の、6月(young leaf; a)、8月(matured leaf; b)、10月の緑葉(old leaf; c)、10月の黄葉(old leaf; d)の分光反射率・透過率。青が葉の表の反射率、緑が裏の反射率、ピンクが表から裏の透過率、オレンジが裏から表の透過率を示す。

## Algorithm Description

### 1. ディレクトリの構造

“PRIMULA”というディレクトリの下には下記のシェルスクリプトおよびディレクトリが置かれている。

- PRIMULA.sh
- LSP
- vegetation

- leaf\_phenology

このうち、“PRIMULAS.sh”がアルゴリズム本体であり、“LSP”、“vegetation”および“leaf\_phenology”にこのアルゴリズムで使われるデータが格納されているディレクトリである。

## 2. Algorithm について

アルゴリズム本体は Bourne shell で書かれており、Unix 上で走らせることができる。

### 2-1. 使い方

端末上で下記のように、年、DOY、場所(緯度・経度)を入れる(※ 南緯・西経の場合はマイナスを付ける)。

```
./PRIMULA {年} {DOY} {緯度} {経度}
```

例:2000年、DOY 200 日における北緯 60 度、西経 100度における個葉の分光反射・透過率を出す場合

```
./PRIMULAS_02.sh 2000 200 60 -100
```

### 2-2. 出力

#### 2-2-1. 出力されるデータ名

- 1 種類の functional type の種が優占する場合(例: Broadleaf deciduous forest)

下記の名前のテキストファイルが出力される。

```
LSP_{年}_{DOY}_{緯度}_{経度}.txt
```

例:2-1 の例の通り走らせた場合、下記のファイルができる(data の内容は「2-2-2. 出力されるデータの内容」を参照)。

```
LSP_2000_200_60_-100.txt
```

- 2種類の異なる functional type が優占場合(例:Mixed dicuduous and evergreen forest)

下記のように優占2つの functional type の個葉の分光特性のファイルが出力される。

```
LSP_{年}_{DOY}_{緯度}_{経度}_1.txt
```

```
LSP_{年}_{DOY}_{緯度}_{経度}_2.txt
```

例:下記のように、2000 年 DOY 180 日、北緯36° 東経137°における個葉の分光データを求めた場合、

```
./PRIMULAS.sh 2000 180 36 137
```

以下のようなテキストファイルが出力される。

```
LSP_2000_180_36_137_1.txt
```

```
LSP_2000_180_36_137_2.txt
```

ここで、指定した北緯36° 東経137°北緯は “Mixed deciduous and evergreen forest and woodland” にあたり、evergreen needle leaf tree と deciduous broad leaf tree が優占している。そのため、evergreen needle leaf tree のデータとして “LSP\_2000\_90\_36\_137\_1.txt” および deciduous broad leaf tree のデータとして “LSP\_2000\_90\_36\_137\_2.txt” が出力されている。

なお、指定した DOY において、片方の functional type (上記の例では deciduous broadleaf tree) が

葉を持たない期間に当たり、もう片方の functional type が葉を持っている場合、葉を持っている functional type の種の分光データである“LSP\_{年}\_{DOY}\_{緯度}\_{経度}\_1.txt”のみが出力される。

出力されるそれぞれのファイルの内容は、上記の functional type がひとつの場合と同様である。

○ 指定した年の DOY が、その植生タイプで優占する functional type の葉の無い期間にあたる場合  
コマンドラインに “No-leaf period” と表示され、結果のテキストファイルは出力されない。

○ 指定した地点に植物が “water” もしくは “bare ground” となっている場合  
植物が生育していないため、コマンドラインに “No vegetation.” と表示され、結果のテキストファイルは出力されない。

## 2-2-2. 出力されるデータの内容

出力されるテキストファイルは図 4 の例のように、最初の 5 行がデータの詳細の header 情報(ファイルの作成者、使用機材、測定植物種、測定場所)となっており、6 行目以降がデータとなっている。データは、右から次の順にデータ列が並んでいる。

- “wl” : wave length
- “R(F)” : 葉の表の反射率
- “T(B->F)” : 葉の裏から表への透過率
- “R(B)” : 葉の裏の反射率
- “T(B->F)” : 葉の表から裏への透過率

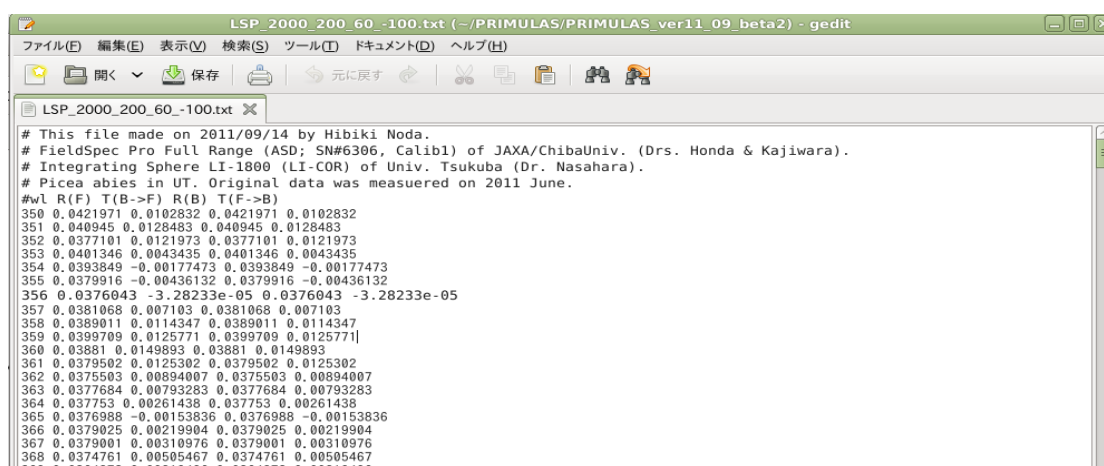


図 4. 出力ファイルの例

出力されるデータの波長範囲は下記のとおりである。

- functional type が grass の場合  
350.007nm から 999.366 nm まで (約 1.6 nm ごと)
- functional type が deciduous broad leaf および crop の場合  
350 nm から 2500 nm まで (1 nm ごと)
- その他の functional type の場合  
350 nm から 1600 nm まで (1 nm ごと)

## 3. ディレクトリ

### 3-1. “LSP”

下記のディレクトリに functional type ごとの個葉の分光特性データが入っている。

- crop
- deciduous\_broad
- deciduous\_needle
- evergreen\_broad
- evergreen\_needle
- grass

上記の各ディレクトリには、個葉の分光特性データ(テキストファイル)およびディレクトリ “original\_data” がある。PRIMULA ver.11.12 では、指定された場所・時期に応じて、この各 functional type ディレクトリからテキストファイルの内容を出力する。

### 3-1-1. 出力される個葉の分光特性

出力されるデータは、各同じ時期、species、leaf type の葉3枚について、同じ機材を用いて実際に測定した値の平均値である。ただし、deciduous\_broad/LSP\_TKY\_LF\_2010\_1006\_Qc.txt および deciduous\_needle/LSP\_FHK\_LF\_2011\_1030\_Lk.txt (それぞれ、deciduous broadleaf tree および deciduous needleleaf tree の “old leaf” として出力)については、後述するように、同じ時期の green leaf と yellow leaf 各 3 枚ずつ測定しており、それらの平均値となっている。

出力されるデータは下記の方法で名前がつけられている。

LSP\_{site name}\_LF\_{year}\_{date}\_{species}\_{leaf type}.txt  
(例:LSP\_TKY\_LF\_2010\_0802\_Qc\_sun.txt)

ここで、“site name”は original data を測定した場所であり、“year”および “date”は original data を測定した年・日付、“species”は測定した植物種、“leaf\_type”は陰葉・陽葉や長枝・短枝などの葉のタイプを示す。データによっては leaf type が無いものもある。Site name と species の詳細については、「3-1-2. original data について」を参照のこと。

### 3-1-2. original data について

original data は下記の方法で名前がつけられている。

LSP\_{site name}\_LF\_{year}\_{date}\_{leaf type}\_{leaf number}\_{使用した積分球タイプ}.txt

original data 観測の詳細は下記の通りである。

#### Study site

All original data of leaf spectrum properties was measured at following sites and institutes.

FHK: Fuji Hokuroku Flux Observation Site  
[http://asiaflux.net/network/001FHK\\_1.html](http://asiaflux.net/network/001FHK_1.html)

MSE: Mase paddy flux site  
[http://asiaflux.net/network/007MSE\\_1.html](http://asiaflux.net/network/007MSE_1.html)

TKY: Takayama deciduous broadleaf forest site  
[http://asiaflux.net/network/015TKY\\_1.html](http://asiaflux.net/network/015TKY_1.html)

TBG: Tsukuba Botanical Garden (Greenhouse)

TGF: Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba  
[http://asiaflux.net/network/060TGF\\_1.html](http://asiaflux.net/network/060TGF_1.html)

QHB: Qinghai Flux Research Site

[http://asiaflux.net/network/052QHB\\_1.html](http://asiaflux.net/network/052QHB_1.html)

UT: Tsukuba Experimental Forest, University of Tsukuba

#### Species and functional type

Pa: ドイツトウヒ *Picea abies* (L.) H.Karst., evergreen needleleaf tree  
Sg: *Shorea giso* (フタバガキ科), evergreen broadleaf tree  
Lk: カラマツ *Larix kaempferi* Sarg., deciduous needleleaf tree  
Os: イネ *Oryza sativa* L., crop  
Qc: ミズナラ *Quercus crispula* Blume, deciduous broadleaf tree  
Poaceae: イネ科草本 sp., grass

#### 測定時期

*P. abies*, *S. giso*, *O. sativa*, Poaceae sp. については、それぞれ “matured leaf” を選び測定を行った。落葉樹である *Q. crispula* と *L. kaempferi* については、“young leaf”、“matured leaf” および “old leaf” の3つの phenological stage においてそれぞれ測定を行った。特に “old leaf” の時期には、分光特性が大きく異なる green leaf (図2 c) と yellow leaf (図2 d) が混在しているため、それぞれ green leaf および yellow leaf の両方について測定を行った。またについては、“young leaf” と “matured leaf” の2時期に測定を行った。

#### 測定機材

下記の分光計と積分球を用いた。

- 分光計
  - FieldSpec Pro Full Range (ASD, USA)
  - FieldSpec Hand Held (ASD, USA) (※LSP\_QHB\_LF\_2011\_0718\_Poaceae のみ)
- 積分球
  - Integrating Sphere RTS-3ZC (ASD, USA)
  - Integrating Sphere LI-1800 (Li-cor, USA)

それぞれのサイトにおいて対象となる葉を採取し、ビニル袋に入れて持ち帰ったものを実験室内で測定した。

#### 3-1-3. PROSPECT の推定によるデータ補完について

個葉の分光特性の測定に用いた積分球は、光源の性質上、長波長の値にノイズが大きいため、PRIMULAS ver.11.11 までは、1600 nm より長い波長のデータは用いてこなかった。そこで、ver.11.12 では、deciduous broad leaf tree および crop について PROSPECT (Jacquemoud and Baret 1990) による推定を行った。

個葉の分光特性を測定した葉については同時に、個葉の生理生態学的特性として leaf mass area (LMA)、含水率、クロロフィル量が測定されている。これらの生理生態学的な特性を入力値として PROSPECT を走らせた。そして、1500-1600 nm において、実測値と推定値の比をとり、これを 1601-2500 nm の間の推定値に掛けたものを 1601-2500 nm の分光反射率・透過率とした。

#### 3-2. “vegetation”

“defries.raw” というバイナリデータとして、緯度・経度 1 度メッシュの全球の植生分類図が置かれている。これは、DeFries and Townshend (1994) の植生分類図である。このデータの詳細については、下記のサイトを参照のこと。

<http://www.geog.umd.edu/landcover/1d-map/1d-doc.html>

#### 3-3. “leaf\_phenology”

各年ごとに、葉の growing period の最初の月(着葉開始月)、最後の月(落葉月)の全球のマップがそれぞれバイナリファイルとして入っている。Growing period の最初の月は、“start\_{year}.raw”、最後の月は、“end\_{year}.raw”となっている。PRIMULAS ver.11.12 では 1982 年から2002年までのデータが使用されている。

#### 4. 葉の phenological stage の区分方法

Leaf phenological stage は、下記の方法で年ごとに計算された。これらの計算は、すべて GRASS 6.4.0 を用いて行われた。計算に使用した気候データおよび、計算の際に GRASS 上で走らせたシェルスクリプトは、“leaf\_phenology”ディレクトリ内の“GRASS”というディレクトリ内に同梱されている。

##### 4-1. 使用データ

気候データは、NCEP/NCAR の気温、降水量データからそれぞれ月平均気温および月降水量としたものを 1982 年から 2002 年までを用いた。PRIMULAS ver.11.12 では、1982 年以前を指定した場合には、1982 年のデータを、2002 年以降であれば、2002 年のデータを使用している。植生データは DeFries and Townshend (1994)を用いた。

##### 4-2. Phenological change を入れる地点の抽出

特に落葉樹の葉は phenological な変化が明確であることから、優占種の少なくともひとつとして落葉樹が含まれる以下の植生タイプにおいてのみ phenology を考慮して計算を行った。

- High latitude deciduous forest and woodland
- Tundra
- Mixed deciduous and evergreen forest and woodland
- Wooded grassland
- Broadleaf deciduous forest and woodland

##### 4-3. growing period の判別

気温の季節変化が顕著な場所では、気温が葉の phenological 変化の要因となっている。一方、気温が年間を通じてほとんど変化しない地域では、降水量の季節変化が要因となる。そこで、PRIMULAS ver.11.12 では、まず第一に月平均気温データを用いて growing period を判別し、次に、気温では分けられなかった場所について、降水量から growing period を判別した。

PRIMULAS ver.11.12 では、growing period を判別するための月平均気温の閾値を、GRASS 6.4.0 上で試算した結果から、もっとも reasonable な結果となった6℃とした。また、植物が利用することのできる水の量は、日射量と降水量とのバランスによって決まるとされる(e.g., Budyko の放射乾燥度)。そこで、緯度ごとの日射量の影響を考慮するため、それぞれの場所の月降水量の閾値は次の式で計算した。

$$\text{月降水量の閾値} = \text{基準となる降水量} * \cos(\text{緯度})$$

基準となる降水量は、GRASS 6.4.0 上で試算した結果から 80 mm とした。

1年で最初に月平均気温あるいは月降水量が閾値以上となった月を growing period の最初の月、最後に月平均気温あるいは月降水量が閾値以上となった月を growing period の最後の月とし、最初の月から最後の月までを growing period とした。

##### 4-4. phenological stage の区分方法

phenological stage は、葉のない期間である“no leaf”と、葉のある growing period を3つに分割した“young leaf”, “matured leaf”そして“old leaf”の計4つに分けた。

○ growing period が3ヶ月以上の場合

growing period の最初の月を “young leaf”、最後の月を “old leaf” とし、それ以外の growing period にあたる月は “matured leaf” とした。

○ growing period が2ヶ月以下の場合

growing period が短い環境に生育する植物は、展葉を開始してから matured になるまでの期間が短いことから、growing period の全期間を “matured leaf” とした。

○ 上記の方法で growing period と “no-leaf period” が分けられなかった場合  
年間を通じて “matured leaf” とした。

## 課題と今後の対応

### 1. 出力データの波長について

LSP\_QHB\_LF\_2011\_0718\_Poaceae.txt (grass) の original data は、Field Spec Hand Held を用いて測定したため、データの波長範囲が約 350 nm から約 1000 nm までの波長となっている。今後、日本国内に生育するイネ科草本について Field Spec Fr を用いて、より長波長までの測定を行い、データの補完を検討する。

また、これを除くデータは 350 nm から 1600 nm までとなっている。これは、1600nm より長い波長では LI-1800 積分球の使用光源の問題でノイズが大きく使用できないためである(図 3 参照)。今後は PROSPECT (Jacquemoud and Baret 1990)を用いたシミュレーションにより、より長い波長の分光特性を求め、実測データと組み合わせることでデータの補完を行うことを検討する。

### 2. vegetation type の指定について

PRIMULAS ver.11.12 では、指定した緯度・経度から、DeFries and Townshend(1994)の vegetation type を参照している。しかし、今後はオプションによって、ユーザーが植生タイプも指定可能にすることを予定している。これにより、植生遷移を考慮したモデルなどで使用することを可能にする。

### 3. 葉以外の部位の分光特性データの追加

幹・枝、有性繁殖器官(花・穂など)など、植物の葉以外の部位の分光特性も群落全体の分光反射特性に大きく影響する。PRIMULAS ver.11.12 では、個葉の分光反射率・透過率のみを出力しているが、以降のバージョンでは、幹や有性繁殖器官の分光特性も出力可能にすることを計画している。

## Reference

DeFries, R. S. and J. R. G. Townshend (1994) NDVI-derived land cover classification at a global scale. International Journal of Remote Sensing, 15, pp 3567-3586

Jacquemoud, S., and F. Baret (1990) PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra, Remote Sensing of Environment, 34, pp 75-91