

# 基于高光谱分析的草地叶绿素含量估算研究进展

马文勇,王训明\*

(中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

**摘要:**叶绿素是草地进行光合作用最重要的色素,与氮素、蛋白质、水分等其他植被生化参数均有着密切关系,是草地光合能力及生理状况的良好指示剂。利用高光谱数据建模分析是实现大面积草地叶绿素含量估算的一种重要手段。本文将基于高光谱分析估算草地叶绿素含量的方法总结为:基于红边位置及光谱指数的经验模型和辐射传输模型两类。经验模型通过建立叶绿素含量与红边位置、光谱指数之间统计关系来估算叶绿素含量,参数简单,实用性较强;但光谱指数构造形式多样且与草地叶绿素含量关系复杂,在一定程度上影响了叶绿素的估算精度。辐射传输模型以叶绿素含量与辐射能量的作用过程作为其理论基础,模型中参数较多且对估算尺度敏感,有待于进一步完善。目前草地叶绿素估算的研究相对薄弱,专门用于估算的模型较少。未来的工作一方面应致力于发展和改进适宜于草地的光谱指数,同时确定合适的辐射传输模型参数以改进模型对草地的监测效果;另一方面,如何由叶片尺度拓展到冠层尺度进而拓展到像元尺度,从而更好地实现大面积草地叶绿素含量估算,是一项既具有重要意义又有挑战性的工作。

**关键词:**高光谱分析;草地叶绿素;红边位置;光谱指数;辐射传输模型

## 1 引言

中国草地面积393万km<sup>2</sup>,约占全国陆地总面积的40%和全球草地总面积的6%~8%(Ni, 2002),是中国分布面积最广的生态系统,对畜牧业发展、水土保持和生态平衡维持起着巨大作用。近年来,干旱、半干旱区的草地退化问题日益严峻,而草地叶绿素含量是研究草地退化的重要切入点。叶绿素是一种植被生化参数,与氮素、蛋白质、水分等其他植被生化参数均有密切关系(Clifton et al, 1994; Gáborčík, 2003),当草地受到破坏时,叶绿素含量会降低,能间接反映草地受外界胁迫后的生理状态(Peñuelas et al, 1998);同时叶绿素也是草地光合作用的重要色素(Niinemets et al, 1997),是草地进行第一性生产的重要物质。综上所述,叶绿素含量可以很好地表征草地光合能力及生理健康状况(Carter

et al, 1994; Lichtenhaler, 1998),可作为评价草地质量的指示指标(Wright et al, 2004; Kokaly et al, 2009)。

草地叶绿素含量获取方法很多,传统方法如化验法(分光光度计法)既耗时又会对植被造成损伤;仪器测试法(如SPAD502)虽然便携却受到野外样点数量的限制,仅能用于小面积调查,在草地资源的管理中作用有限。因此,为快速获取大面积草地叶绿素信息以便及时准确地监测草地质量状况,传统方法有一定难度。而借助于机载成像光谱仪和星载高光谱成像仪提供的高光谱数据,利用遥感手段快速获取大面积草地叶绿素信息已成为一种重要而广为接受的研究方法(Jago et al, 1999; Richardson et al, 2002; Zhang et al, 2008; Si et al, 2012)。大面积草地叶绿素估算的实现对于合理开发与保护草地资源,有效发展畜牧业,最大限度地保持或提高

收稿日期:2015-04;修订日期:2015-08。

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(41225001) [Foundation: National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China, No.41225001]。

作者简介:马文勇(1988-),男,山东新泰人,博士生,主要从事沙漠化与遥感监测研究,E-mail: mawenyong2162@126.com。

通讯作者:王训明(1970-),男,安徽安庆人,研究员,博导,主要从事沙漠化与干旱区环境演变研究,E-mail: xunming@igsrr.ac.cn。

引用格式:马文勇,王训明. 2016. 基于高光谱分析的草地叶绿素含量估算研究进展[J]. 地理科学进展, 35(1): 25-34. [Ma W Y, Wang X M. 2016. Progress on grassland chlorophyll content estimation by hyperspectral analysis[J]. Progress in Geography, 35(1): 25-34.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.01.004

草地生产力以及维护草地生态系统结构和功能具有重要的作用(张云海等,2013)。

基于高光谱分析的草地叶绿素含量估算,是指在深入分析草地光谱特征及其生物理化参数量化特征基础上,通过探索最优波段或波段组合,并利用数学模型来实现草地叶绿素的评估。目前使用高光谱分辨率遥感数据估算草地叶绿素含量的数学模型主要有以下两类:①经验模型。利用统计方法建立叶绿素含量与草地光谱特征之间的回归模型,从而估算叶绿素含量。常用的草地光谱特征有两个:一是特定光谱位置—红边位置;二是光谱指数,包括光谱反射率、导数光谱及由此衍生的不同形式的光谱组合。②物理模型。其中辐射传输模型通过分析草地叶绿素含量与辐射能量的作用过程能较好地模拟草地光谱特征,在草地叶绿素反演中取得了一定效果,常用的辐射传输模型有叶片尺度的PROSPECT和冠层尺度的PROSAIL。本文将从两个方面对上述模型进行详细阐述,首先总结现有研究中红边位置、光谱指数和辐射传输模型的计算方法,在此基础上,概括它们估算植被叶绿素含量的方法与效果,探讨其针对草地的适用性与不

足,以期为大面积草地叶绿素含量估算提供参考。

2 基于红边位置及光谱指数的经验模型

基于红边位置及光谱指数的经验模型中,通过建立叶绿素含量与红边位置、指数之间的统计关系估算草地叶绿素含量,具有关系密切、参数简单、计算方法简便、实用性较强等特点。

2.1 基于红边位置估算草地叶绿素含量

2.1.1 红边位置计算方法概要

由于红边位置是指反射率一阶导数在红—近红外区间内的拐点,因此其精确计算需要此区域许多窄波段的光谱数据。目前,红边位置的计算方法主要分为两类:一类是基于导数光谱,如最大一阶微分法、拉格朗日插值法和线性外推法等;另一类则是基于曲线拟合技术,如线性插值法、倒高斯模型和多项式拟合法等(表1)。

基于导数光谱的最大一阶微分法由于简单易算且能够消除光谱数据中背景噪音的影响而得到广泛应用,但研究(Horler et al, 1983)发现这种方法

表1 6种红边位置提取技术比较

Tab.1 Comparison of six red edge position (REP) techniques

红边位置技术	算法	执行难易及光谱类型	参考文献
最大一阶微分	$D_{\lambda(i)} = \frac{(R_{\lambda(i+1)} - R_{\lambda(i)})}{\Delta\lambda}$ <p>REP为Max(<math>D_{\lambda(i)}</math>)对应的<math>\lambda</math></p>	容易 反射率光谱	Horler et al, 1983
拉格朗日插值	$A = \frac{D_{\lambda(i-1)}}{(\lambda_{i-1} - \lambda_i)(\lambda_{i-1} - \lambda_{i+1})}$ $B = \frac{D_{\lambda(i)}}{(\lambda_i - \lambda_{i-1})(\lambda_i - \lambda_{i+1})}$ $C = \frac{D_{\lambda(i+1)}}{(\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1})(\lambda_{i+1} - \lambda_i)}$ $REP = \frac{A(\lambda_i + \lambda_{i+1}) + B(\lambda_{i-1} + \lambda_{i+1}) + C(\lambda_{i-1} + \lambda_i)}{2(A + B + C)}$	适中 导数光谱	Dawson et al, 1998
线性外推法	远红色区直线: $D_\lambda = m_1\lambda + c_1$ 近红外区直线: $D_\lambda = m_2\lambda + c_2$ $REP = -(c_1 - c_2)/(m_1 - m_2)$	适中 导数光谱	Cho et al, 2006
线性插值	$R_{rep} = (R_{670} + R_{780})/2$ $REP = 700 + 40 \frac{R_{rep} - R_{700}}{R_{740} - R_{700}}$	容易 反射率光谱	Guyot et al, 1988
倒高斯模型	$R(\lambda) = R_s - (R_s - R_0) \exp\left(-\frac{(\lambda_0 - \lambda)^2}{2\delta^2}\right)$ $REP = \lambda_0 + \delta$	困难 反射率光谱	Bonham-Carter, 1988
多项式拟合	$R_{\lambda(i)} = a_0 + \sum_{j=1}^5 a_j \lambda^j$ <p>REP为Max(<math>D_{\lambda(i)}</math>)对应的<math>\lambda</math></p>	较难 反射率光谱	Pu et al, 2003

注:  $i$ 表示波段,  $\lambda(i)$ 表示波段 $i$ 的波长,  $R_\lambda$ 表示波长 $\lambda$ 处的反射率,  $D_\lambda$ 表示波长 $\lambda$ 处反射率的一阶导数,  $m$ 和 $c$ 代表斜率和直线的截距,  $R_s$ 为近红外区间光谱反射率最大值,  $R_0$ 为红光区光谱反射率最小值,  $\lambda_0$ 为 $R_0$ 对应波长,  $\delta$ 为高斯模型标准差系数,  $a_0$ 、 $a_1$ 等为特定系数。

会产生位于700 nm和725 nm的两个峰值,导致了红边—叶绿素关系的不连续性。Lamb等(2002)进一步研究指出,第一个峰值和低叶绿素含量有较好相关性而第二个峰值和高叶绿素含量有较好相关性。研究人员在对草地冠层光谱的研究中也证实了这一点(Clevers et al, 2004; Smith et al, 2004)。近年来随着高光谱数据处理手段的进步,基于曲线拟合技术的方法(如倒高斯模型)逐渐得到了一定程度的应用(陈雪洋等, 2011)。Cho等(2006)提出的线性外推法可有效减轻红边位置对叶绿素含量变化的不敏感性和不连续性,能充分追踪叶绿素吸收峰附近的光谱变化,因此和叶绿素含量的关系最好(薛利红等, 2008; 姚霞等, 2010)。

### 2.1.2 红边位置对草地叶绿素含量估算研究

由于植被反射光谱在400~700 nm的可见光区域主要受植被色素(叶绿素和类胡萝卜素)影响,在近红外区域则主要受叶片内部结构和其他生化参数(蛋白质、纤维素)影响,因此可以用植被反射光谱来估算其生化参数,尤其是色素含量(Thomas et al, 1977)。研究表明,叶绿素吸收波段为680 nm(Blackburn, 1998),导致叶绿素对红光吸收强烈,形成了植被光谱曲线中红光部分的低谷;而光在叶片内部的多次散射导致了近红外区域的高反射率,造成了绿色植被在680~750 nm时的光谱反射率快速上升区域“红边”。在植被反射光谱曲线中,红边是其最明显的光谱特征之一,是描述植被叶绿素状态的重要指示波段。红边位置(REP)则是植被在这一区间反射率增高最快的波长位置,也是光谱反射率一阶导数在该区间内的拐点。历经30多年的研究,红边位置至今仍然是估算植被叶绿素含量的重要光谱参数(Boochs et al, 1990; Asner et al, 2005; Sims et al, 2006)。

草地叶绿素含量与红边位置具有较好的相关关系(Pinar et al, 1996)。图1为从机载CASI高光谱影像提取的草地红边位置图,该草地叶面积指数变化不大。Jago等(1999)指出,随着草地叶绿素含量的增加,红边逐渐向长波方向移动,即红移现象。同时,随着叶绿素含量的降低,红边会逐渐向短波方向移动,即蓝移现象(Rock et al, 1988)。

基于红边位置与叶绿素含量的相关关系,研究人员通过建立回归模型估算得到叶绿素含量。由于不同类型植被具有不同的光谱特性,计算得到的红边位置也会有差异,所以针对不同类型植被建立

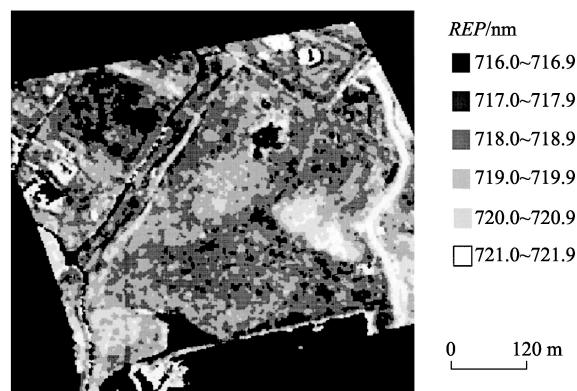


图1 英国肯特郡谷岛某处草地的红边位置图  
(引自Jago et al, 1999)。

Fig.1 Red edge position (REP) image of a grassland site, Isle of Grain, Kent, the United Kingdom (reproduced from Jago et al, 1999).

的回归方程会出现形式上的差异。对草地来说,常见回归形式为简单的线性回归,如 $Chl=a+b \times REP$ (Clevers et al, 2001),其中 $Chl$ 为叶绿素或叶绿素相关物质的含量, $REP$ 为红边位置, $a$ 和 $b$ 为拟合参数。这种基于红边位置建立回归方程估算草地叶绿素含量的方法,回归关系较单一,实际应用中易于操作。

## 2.2 基于光谱指数估算草地叶绿素含量

### 2.2.1 光谱指数类型及计算方法概要

为了使植被反射信息最大和外部因素影响最小,研究人员提出并构建了一些高光谱指数,这些高光谱指数以其特有的精细光谱特征,能获得非常细微的植被生理状况和环境胁迫差异,使其在叶绿素含量的反演方面有着广阔的应用前景。根据各个指数的构造形式及构造原理,高光谱指数总体来说可以分为以下四种类型:单波谱及其变换形式,归一化光谱指数及其变换形式,比值光谱指数及其变换形式,多波段光谱指数(表2)。

单波谱指数重在探寻不同植被类型在不同生长期对叶绿素的敏感波段;归一化光谱指数由基于红光区域的低反射率和近红外区域的高反射率构成,一定程度上消除了大气气溶胶和土壤背景的影响,基本形式为 $NDSI=[R_x-R_y]/[R_x+R_y]$ , $R_x$ 取值一般为750~900 nm,而 $R_y$ 为660~720 nm;比值光谱指数同样基于红光区域的低反射率和近红外区域的高反射率构成,基本形式为 $SR=R_x/R_y$ ;多波段光谱指数至少包含三个波段,构造形式相对复杂,其目的也



表2 叶绿素相关光谱指数

Tab.2 Spectral indices developed as chlorophyll indicators

指数类型	指数缩写	计算公式	参考文献
单波谱及其变换形式	RR	$R_{700}^{-1}$	Gitelson et al, 1999
	LRR	$\text{Log}R_{737}^{-1}$	Yoder et al, 1995
归一化型光谱指数	NDI	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$	Richardson et al, 2002; Tucker, 1979; Gitelson, Merzlyak, 1996
		$(R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670})$	
		$(R_{800} - R_{550}) / (R_{800} + R_{550})$	
	mNDI	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} - 2R_{445})$	Sims et al, 2002
比值型光谱指数	OSAVI	$(NIR - R) / (NIR + R + X)$	Rondeaux et al, 1996
	SR	$R_{750} / R_{700}$	Gitelson, Merzlyak, Lichtenthale, 1996, 1999; Sims et al, 2006
		$R_{800} / R_{680}$	
		$F_{735} / F_{700}$	
	CI <sub>red-edge</sub>	$D_{720} / D_{700}$	Clevers et al, 2011
		$(R_{780} / R_{710}) - 1$	
		$(R_{750} - R_{445}) / (R_{705} - R_{445})$	
	PSSR	$PSSRa = R_{800} / R_{675}$	Blackburn, 1998, 1999; Sims et al, 2002
		$PSSRb = R_{800} / R_{650}$	
	RARS	$RARSa = R_{675} / R_{700}$	Chappelle et al, 1992; Blackburn, 1999
		$RARSb = R_{675} / R_{650} \times R_{700}$	
多波段光谱指数	MTCI	$(R_{753.75} - R_{708.75}) / (R_{708.75} - R_{681.25})$	Dash et al, 2007
	GCI	$(R_{780} - R_{735}) / (R_{715} - R_{670})$	肖汉等, 2014
	DCNI	$(R_{720} - R_{700}) / (R_{700} - R_{670}) / (R_{720} - R_{670} + 0.03)$	Chen et al, 2010
	CARI	$\left[ a \times 670 + R_{670} + b / (a^2 + 1) \right]^{0.5} (R_{700} / R_{670})$	Kim et al, 1994
		$a = (R_{700} - R_{550}) / 150; b = R_{550} - (a \times 550)$	
		$\left[ (R_{750} - R_{705}) - 0.2(R_{750} - R_{550}) \right] (R_{750} / R_{705})$	
	MCARI/	$(1 + 0.16)(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} + 0.16)$	Wu et al, 2008
	OSAVI		
	RII	$\int_{705}^{750} (R_{\lambda} / R_{705} - 1) d\lambda$	Richardson et al, 2002
	NAOC	$1 - \frac{\int_{643}^{795} R_{\lambda} d\lambda}{152R_{795}}$	Delegido et al, 2010

注:下标表示波长 $\lambda$ ,  $R_{\lambda}$ 表示波长 $\lambda$ 处的反射率,  $F_{\lambda}$ 表示波长 $\lambda$ 处的叶绿素荧光,  $D_{\lambda}$ 表示波长 $\lambda$ 处反射率的一阶导数,  $NIR$ 表示近红外反射率,  $R$ 表示红波段反射率,  $X$ 为特定系数。

是为了进一步减轻外界因素(大气气溶胶和土壤背景)及植被冠层结构和冠层非光合作用物质的干扰,基本形式有 $[R_a - R_b] / [R_b - R_c]$ 、 $[R_a - R_b] / [R_c - R_d]$ 及积分光谱,其中 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 值大致在680~750 nm之间,且 $a > b > c > d$ 。

Le Maire等(2004)对比较成熟的叶绿素指数进行了统计,指出大部分指数都是对农作物进行叶绿素反演研究,专门针对草地的指数几乎没有。本文概括的四种形式的高光谱指数,除了多波段光谱指数中的GCI(肖汉等, 2014)是专门针对草地研究之外,其他同Le Maire等(2004)的研究相一致,大部分用于农作物和森林植被的叶绿素研究。研究人员将其中一部分光谱被指数应用在草地叶绿素估算上,同样取得了较好的结果(Sims et al, 2002; Clev-

ers et al, 2011),而对于尚未应用的指数,需要后续研究工作的确定。

### 2.2.2 光谱指数对草地叶绿素含量的估算研究

在可见光的红光和蓝光区域,植被反射光谱曲线呈现低谷,红光区域主要是受到叶绿素强烈吸收而蓝光区域则受到叶绿素和类胡萝卜素的共同吸收。相比蓝光区域受到类胡萝卜素的干扰,红光区域更适宜叶绿素含量的估算,很多单波段指数也都出现在红光区域。Blackburn(1998)研究发现,尽管波谱反射率680及650 nm处分别对应叶绿素 $a$ 及叶绿素 $b$ 的最大吸收峰,但实际常用波段往往会小幅度偏离这些波长。Yoder等(1995)利用植被光谱曲线700 nm附近的反射率估算了枫树叶片叶绿素含量( $R^2=0.64$ ),Gitelson等(1999)利用700 nm反射率估

算了三种高等植物叶片叶绿素含量 [ $R_{700}=6450/(Chl+121)$ ,  $R^2=0.95$ ]。同是基于 700 nm 反射率波段,但是实际估算效果相差较大,这表明单一波段指数估算叶绿素含量易受到外界因素(如大气气溶胶和土壤背景)的影响,在影像质量不好或者下垫面复杂地区(如稀疏草地)效果可能不好。

在近红外区域,植被光谱曲线反射率高达 40%~50%,主要由于光在叶片内部的多次散射而成。与单片叶片相比,多片叶片在近红外波段会产生更高的反射率。利用植被在红光和近红外区域反射率差异,结合手持叶绿素仪的工作原理,研究人员通过简单的比值运算和归一化运算,构造了 SR (比值光谱指数)及 NDSI (归一化光谱指数)进行叶绿素含量估算。Gitelson, Merzlyak, Lichtenthale(1996)、Richardson 等(2002)和 Clevers 等(2011)利用植被叶片 700 nm 和 750 nm 附近的反射率估算了植被叶绿素含量并取得了较好的结果( $R^2>0.94$ ),这表明双波段组合一定程度上消除了大气气溶胶和土壤背景的影响。Richardson 等(2002)进一步指出,在叶绿素含量较低时( $0.0004\sim0.0455\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ),这些光谱指数估算结果精度超过了手持叶绿素仪 SPAD502;但在叶绿素含量较高时则出现了饱和现象,表明双波段构造指数在一定程度上仍然受到植被自身结构,尤其是叶面积指数的干扰。天然草地种类组成繁多,层次结构复杂,SR 和 NDSI 在对草地叶绿素含量进行估算时,效果相对较差。Sims 等(2002)总结了自然条件下不同植被类型不同叶片结构的叶绿素含量估算效果,认为草地估算效果相比森林较差;Amiri 等(2011)采用 NDI (归一化差别指数)和 SRI (简单比值指数)估算了澳大利亚北部草原的叶片叶绿素含量,结果发现这两个光谱指数应用在次大陆尺度的普适性较差。

为在消除外界因素(如大气气溶胶和土壤背景)的影响下,进一步消除植被自身结构的干扰,研究人员用多达四个波段构造的复杂光谱指数估算了叶绿素含量(Haboudane et al, 2002; Wu et al, 2008),并且取得了较好的结果( $R^2=0.8$ )。Dash 等(2007)发现,在叶绿素含量较高时,MTCI(MERIS 陆地叶绿素指数)仍然能够比较准确估算出植被叶绿素含量( $R^2>0.73$ )。相比构造形式简单的光谱指数,多光谱指数在一定程度上消除了干扰,使其在对复杂植被结构的估算中也能保证一定的精度。在对天然草地叶绿素的估算中,多光谱指数显著提升了其估算

精度。肖汉等(2014)提出了多光谱指数 GCI (草地叶绿素含量指数),并估算了中国四川省松潘草原和内蒙古自治区贡格尔草原的草地叶绿素含量( $R^2=0.703$ ),相比传统的 CARI(叶绿素吸收比值指数)、SIPI(结构不敏感色素指数)和 MTCI 指数,它的敏感性更强,更适宜草地叶绿素估算。

从单一波段指数到复杂光谱指数,这种形式上的多样性使基于光谱指数的经验模型成为目前较实用、普适性较强的研究方法(董恒等, 2012)。与森林和农作物相比,草地受自身种类组成及层次结构的影响,较新的光谱指数显著提升了其叶绿素估算精度。许多研究中利用高光谱指数估算植被叶绿素含量的主要方法还是回归方法(特别是逐步回归),找出与叶绿素含量相关的波段并构造合适光谱指数,然后建立这些指数与叶绿素含量间的回归分析,进而建立回归模型。目前草地叶绿素估算常见回归形式有简单的线性回归,如:  $Chl=a+b\times Index$  (Vuolo et al, 2012; Wong et al, 2013),其中  $Chl$  为叶绿素含量,  $Index$  为高光谱指数,  $a$  和  $b$  为拟合参数。

### 3 辐射传输模型

#### 3.1 辐射传输模型的原理与发展

基于物理规律的辐射传输模型通过分析叶片或冠层叶绿素含量与辐射能量的作用过程,利用数学方法模拟得到植被叶片的反射率、透射率及冠层的反射率,为模型的前向过程。与之相反的是,从实测植被叶片的反射率、透射率及冠层的反射率数据获取植被叶片或冠层叶绿素含量的过程为模型的反向过程。遥感反演就是根据实测光谱信息结合模型的前向过程,求解或推算目标参数,也就是从实测的光谱反射率估算植被叶绿素含量(图 2)。研究人员提出用不同方法解决辐射传输模型的反演问题,经常使用的反演算法包括数值优化方法、查找表法、人工神经网络和支持向量机回归(Kimes et al, 2000; Liang, 2004)。相对于经验模型,辐射传输模型物理意义明确,不再局限于几个特定波长反射率,有效地利用了连续光谱数据,在叶绿素估算方面表现出更强的稳定性和可移植性,能估算不同植被叶片及冠层尺度叶绿素含量(Ustin et al, 2004)。

常用的辐射传输模型有叶片尺度的 PROSPECT、LIBERTY、LEAFMOD 等,冠层尺度的 SAIL、NADI 等及它们彼此之间的耦合模型,但上

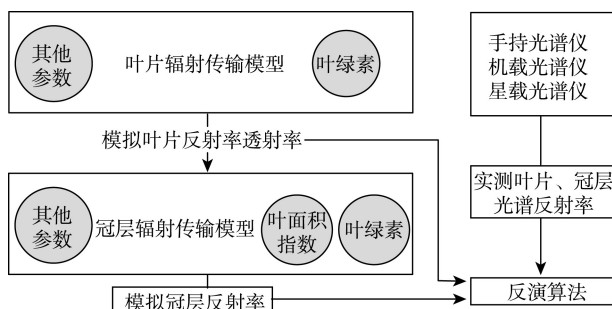


图2 叶绿素反演的辐射传输模型方法

Fig.2 Radiative transfer models for estimating chlorophyll content

述模型主要应用于某一作物类型、某一森林植被及其混合形式 (Newnham et al, 2001; Botha et al, 2010)。几年来辐射传输模型在草地叶绿素估算中的作用越来越重要,但天然草地由于自身复杂的种类组成和层次结构且容易受到人为因素干扰(施肥、放牧、刈割),导致上述许多模型不适用或者反演效果不好。基于叶片尺度辐射传输模型 PROSPECT、冠层尺度传输模型 SAIL 及其耦合模型 PROSAIL 由于简单易用,逐渐移植到草地叶绿素估算中 (Vohland et al, 2008; Si et al 2012)。

PROSPECT 是 Jacquemoud 等 (1990) 基于对 Allen 平板的改进建立的叶片光学模型,它假设叶片是由  $N$  层同性质平板叠加而成,由  $N-1$  层空气隔开,光线的非漫射特性只存在于最顶层,而在叶子内部,光线被认为是各向同性。通过建立叶片结构参数、生物化学参数与叶片反射率和透射率的函数,模拟叶片在 400~2500 nm 的光学特性。其计算公式较为简单:

$(\rho_l, \tau_l) = \text{PROSPECT}(N, C_{ab}, C_w, C_m)$ , 各参数的意义详见 Jacquemoud 等 (1990)。目前,最新的 PROSPECT5 模型增加了类胡萝卜素  $C_x$  吸收的计算,使其模拟精度更高 (Feret et al, 2008)。PROSPECT 模型模拟计算得到的叶片光谱信息作为 SAIL 冠层辐射模型的输入参数。SAIL 模型是基于 Suits 改进的冠层二向反射率模型,它假设叶片方位角分布均匀,考虑任意的叶片倾角,模拟冠层的双向反射率。SAIL 模型着重考虑了冠层多次散射的影响,主要适用于可以假设为水平均匀的浓密冠层,其计算公式如下:

$\rho(\lambda) = \text{SAIL}(LAI, \alpha, \rho_l(\lambda), \tau_l(\lambda), \rho_s(\lambda), \theta_s, \theta_v, \theta_{sv}, s_l, SKYL)$ , 各参数的意义详见王李娟等 (2014), 其中对叶绿素影响比较大的输入因子为叶面积指数 (Ver-

hoef, 1984)。在没有多角度观测数据的条件下,单独利用冠层模型无法反演得到叶片的叶绿素含量。为达到反演目的,PROSAIL 辐射传输模型耦合了叶片光学特性模型 PROSPECT 与冠层反射率模型 SAIL,考虑了土壤背景、植被冠层的热点效应及叶倾角分布反射特征,将 PROSPECT 模型输出的叶片尺度反射率转换为冠层尺度反射率,成为应用较广的叶片—冠层模型。

### 3.2 辐射传输模型的估算效果及对草地的适用性

叶片—冠层辐射传输模型各个参数敏感性分析结果表明,在可见光波段,对模拟结果影响最大的参数是叶绿素含量,其贡献率达到 60% (Bacour et al, 2002);在近红外波段,影响最大的参数则是叶面积指数,贡献率达到 50% 以上 (王李娟等, 2014)。这表明,对于形态相对一致的植被叶片或者均匀的冠层来说,辐射传输模型效果较好,但是随着植被的混合,模型的精度呈现下降趋势。Jacquemoud 等 (1996) 应用 PROSPECT 模型结合 LOPEX93 数据集反演了多种类型叶片叶绿素含量,但整体估算结果较差 ( $R^2=0.68$ );而 Ma 等 (2012) 根据不同叶片形态对 PROSPECT 模型逐一进行修正并估算叶绿素含量,发现逐一修正的结果其精度有了大幅度提高 ( $R^2$  由 0.41 上升到 0.75)。

近年来研究人员开展了辐射传输模型反演草地叶绿素含量的研究,由于草地和其他植被的差异性,而且模型中的参数并不是针对草地设定的,所以反演结果和实际叶绿素观测结果会有一定程度的偏离 (Vohland et al, 2008)。研究认为,辐射传输模型对异质性草地叶绿素反演效果总体较差,并且指出随着单位面积草类的增加,模型的反演精度呈下降趋势 (Darvishzadeh et al, 2008)。尽管总体结果较差,但在不同尺度,模型反演结果存在明显差异。在叶片尺度,模型对草地叶绿素含量估算效果较差;而在冠层尺度,估算效果相对较好 (Si et al, 2012)。

## 4 结论与讨论

目前植被叶绿素的估算重心仍在森林和农作物方面,针对草地叶绿素的研究相对薄弱。基于红边位置和光谱指数的经验模型在估算草地或其他植被叶绿素含量时,除了建立的回归模型不同外,并没有本质上的区别;但某些光谱指数是否适合于草地估算,仍有待于后续的研究工作证实;基于物



理规律的辐射传输模型则有很强的针对性,用于草地估算主要有叶片尺度的PROSPECT及冠层尺度的PROSAIL耦合模型。天然草地由于自身复杂的种类组成及层次结构且容易受到人为因素干扰(施肥、放牧、刈割),辐射传输模型的估算效果较差,还需要加以改进。经验模型依然是目前较实用、普适性较强的研究方法,尤其是其中的光谱指数法。

受限与高光谱数据和实际样点数据的获取,目前大部分叶绿素估算研究仍停留在叶片或者冠层尺度(冠层叶绿素含量=叶片叶绿素含量×叶面积指数)。另外,冠层尺度叶绿素含量的提取会受到土壤背景及植被冠层结构的干扰,尤其是叶面积指数干扰。经验模型方法是一种近似方法,可针对不同尺度建立不同的回归模型;而辐射传输模型PROSPECT在叶片尺度的估算效果较差,而PROSAIL模型在冠层尺度估算效果一般。

经验模型未来的工作重点应在现有光谱指数的基础上,结合不同类型草地特点构造新的光谱指数,以取得比现有指数更好的估算效果。辐射传输模型有多个输入参数,在进一步明晰其运行原理的情况下,针对草地类型特点确定合适的模型参数以改进模型估算效果,从而提高草地叶绿素含量的估算水平。当前研究仍然集中在叶片及冠层尺度,由叶片尺度拓展到冠层尺度进而拓展到像元尺度进而实现大面积草地叶绿素含量估算,是草地叶绿素估算走向实际应用的必要途径。在此基础上,结合多时相遥感数据实现草地叶绿素含量的连续估算,为长期合理利用和保护草地资源提供保障,是一项既具有重要意义又具有挑战性的工作。

## 参考文献(References)

陈雪洋, 蒙继华, 吴炳方, 等. 2011. 基于HJ星高光谱数据红边参数的冬小麦叶面积指数反演[J]. 中国科学: 信息科学, 41(S1): 213-220. [Chen X Y, Meng J H, Wu B F, et al. 2011. Study on monitoring the winter wheat Leaf Area Index based on HJ-1 HSI red edge Parameters[J]. Scientia Sinica Informationis, 41(S1): 213-220.]

董恒, 孟庆野, 王金梁, 等. 2012. 一种改进的叶绿素提取植被指数[J]. 红外与毫米波学报, 31(4): 336-341. [Dong H, Meng Q Y, Wang J L, et al. 2012. A modified vegetation index for crop canopy chlorophyll content retrieval [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 31(4): 336-341.]

王李娟, 牛铮. 2014. PROSAIL模型的参数敏感性研究[J]. 遥感技术与应用, 29(2): 219-223. [Wang L J, Niu Z. 2014.

Sensitivity analysis of vegetation parameters based on PROSAIL model[J]. Remote Sensing Technology and Application, 29(2): 219-223.]

肖汉, 陈秀万, 杨振宇, 等. 2014. 基于光谱分析的草地叶绿素含量估测植被指数[J]. 光谱学与光谱分析, 34(11): 3075-3078. [Xiao H, Chen X W, Yang Z Y, et al. 2014. Vegetation index estimation by chlorophyll content of grassland based on spectral analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 34(11): 3075-3078.]

薛利红, 杨林章. 2008. 采用不同红边位置提取技术估测蔬菜叶绿素含量的比较研究[J]. 农业工程学报, 24(9): 165-169. [Xue L H, Yang L Z. 2008. Comparative study on estimation of chlorophyll content in spinach leaves using various red edge position extraction techniques[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 24(9): 165-169.]

姚霞, 田永超, 刘小军, 等. 2010. 不同算法红边位置监测小麦冠层氮素营养指标的比较[J]. 中国农业科学, 43(13): 2661-2667. [Yao X, Tian Y C, Liu X J, et al. 2010. Comparative study on monitoring canopy leaf nitrogen status on red edge position with different algorithms in wheat [J]. Scientia Agricultura Sinica, 43(13): 2661-2667.]

张云海, 何念鹏, 张光明, 等. 2013. 氮沉降强度和频率对羊草叶绿素含量的影响[J]. 生态学报, 33(21): 6786-6794. [Zhang Y H, He N P, Zhang G M, et al. 2013. Nitrogen deposition and Leymus chinensis leaf chlorophyll content in Inner Mongolian grassland[J]. Acta Ecologica Sinica, 33(21): 6786-6794.]

Amiri R, Beringer J, Isaac P. 2011. Narrowband spectral indices for the estimation of chlorophyll along a precipitation gradient[C]//Proceedings of the 3rd workshop on hyperspectral image and signal processing: Evolution in remote sensing (WHISPERS). Lisbon: IEEE: 1-4.

Asner G P, Elmore A J, Flint Hughes R, et al. 2005. Ecosystem structure along bioclimatic gradients in Hawai'i from imaging spectroscopy[J]. Remote Sensing of Environment, 96(3-4): 497-508.

Bacour C, Baret F, Jacquemoud S. 2002. Information content of HyMap hyperspectral imagery[C]//Proceedings of the 1st international symposium on recent advances in quantitative remote sensing. Valencia, Spain, 16: 503-508.

Blackburn G A. 1998. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: A test using senescent tree leaves[J]. International Journal of Remote Sensing, 19(4): 657-675.

Blackburn G A. 1999. Relationships between spectral reflectance and pigment concentrations in stacks of deciduous broadleaves[J]. Remote Sensing of Environment, 70(2): 224-237.

- Bonham-Carter G F. 1988. Numerical procedures and computer program for fitting an inverted Gaussian model to vegetation reflectance data[J]. *Computers & Geosciences*, 14(3): 339-356.
- Boochs F, Kupfer G, Dockter K, et al. 1990. Shape of the red edge as vitality indicator for plants[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 11(10): 1741-1753.
- Botha E J, Leblon B, Zebarth B J, et al. 2010. Non-destructive estimation of wheat leaf chlorophyll content from hyperspectral measurements through analytical model inversion[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 31(7): 1679-1697.
- Carter G A, Miller R L. 1994. Early detection of plant stress by digital imaging within narrow stress-sensitive wavebands[J]. *Remote Sensing of Environment*, 50(3): 295-302.
- Chappelle E W, Kim M S, McMurtrey III J E. 1992. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): An algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids in soybean leaves[J]. *Remote Sensing of Environment*, 39(3): 239-247.
- Chen P F, Haboudane D, Tremblay N, et al. 2010. New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat[J]. *Remote Sensing of Environment*, 114(9): 1987-1997.
- Cho M A, Skidmore A K. 2006. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: The linear extrapolation method[J]. *Remote Sensing of Environment*, 101(2): 181-193.
- Clevers J G P W, Kooistra L. 2001. Assessment of heavy metal contamination river floodplains by using the red-edge index[C]//Proceeding of the 3rd EARSeL Workshop on imaging spectroscopy. Hersching: Wageningen University & Research Centre.
- Clevers J G P W, Kooistra L. 2011. Using hyperspectral remote sensing data for retrieving total canopy chlorophyll and nitrogen content[C]//Proceedings of 3rd Workshop on hyperspectral image and signal processing: Evolution in remote sensing (WHISPERS). Lisbon: IEEE: 1-4.
- Clevers J G P W, Kooistra L, Salas E A L. 2004. Study of heavy metal contamination in river floodplains using the red-edge position in spectroscopic data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 25(19): 3883-3895.
- Clifton K E, Bradbury J W, Vehrencamp S L. 1994. The fine-scale mapping of grassland protein densities[J]. *Grass and Forage Science*, 49(1): 1-8.
- Darvishzadeh R, Skidmore A, Schlerf M, et al. 2008. Inversion of a radiative transfer model for estimating vegetation LAI and chlorophyll in a heterogeneous grassland[J]. *Remote Sensing of Environment*, 112(5): 2592-2604.
- Dash J, Curran P J. 2007. Evaluation of the MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI) [J]. *Advances in Space Research*, 39(1): 100-104.
- Dawson T P, Curran P J. 1998. Technical note A new technique for interpolating the reflectance red edge position [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 19(11): 2133-2139.
- Delegido J, Alonso L, González G, et al. 2010. Estimating chlorophyll content of crops from hyperspectral data using a normalized area over reflectance curve (NAOC)[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(3): 165-174.
- Feret J B, François C, Asner G P, et al. 2008. PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments[J]. *Remote Sensing of Environment*, 112(6): 3030-3043.
- Gáborčík N. 2003. Relationship between contents of chlorophyll (a+b) (SPAD values) and nitrogen of some temperate grasses[J]. *Photosynthetica*, 41(2): 285-287.
- Gitelson A A, Buschmann C, Lichtenthaler H K. 1999. The chlorophyll fluorescence ratio  $R_{735}/F_{700}$  as an accurate measure of the chlorophyll content in plants[J]. *Remote Sensing of Environment*, 69(3): 296-302.
- Gitelson A A, Merzlyak M N. 1996. Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll[J]. *Journal of Plant Physiology*, 148(3-4): 494-500.
- Gitelson A A, Merzlyak M N, Lichtenthaler H K. 1996. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm[J]. *Journal of Plant Physiology*, 148(3-4): 501-508.
- Guyot G, Baret F, Major D J. 1988. High spectral resolution: Determination of spectral shifts between the red and the near infrared[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 11: 750-760.
- Haboudane D, Miller J R, Tremblay N, et al. 2002. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture [J]. *Remote Sensing of Environment*, 81(2-3): 416-426.
- Horler D N H, Dockray M, Barber J. 1983. The red edge of plant leaf reflectance[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 4(2): 273-288.
- Jacquemoud S, Baret F. 1990. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra[J]. *Remote Sensing of Environment*, 34(2): 75-91.
- Jacquemoud S, Ustin S L, Verdebout J, et al. 1996. Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 56(3): 194-202.



- Jago R A, Cutler M E J, Curran P J. 1999. Estimating canopy chlorophyll concentration from field and airborne spectra [J]. *Remote Sensing of Environment*, 68(3): 217-224.
- Kim M S, Daughtry C S T, Chappelle E W, et al. 1994. The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation (APAR) [C]// *Proceedings of the 6th Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*. Val D'Isere, France: ISPRS: 299-306.
- Kimes D S, Knyazikhin Y, Privette J L, et al. 2000. Inversion methods for physically-based models[J]. *Remote Sensing Reviews*, 18(2-4): 381-439.
- Kokaly R F, Asner G P, Ollinger S V, et al. 2009. Characterizing canopy biochemistry from imaging spectroscopy and its application to ecosystem studies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 113(S1): S78-S91.
- Lamb D W, Steyn-Ross M, Schaare P, et al. 2002. Estimating leaf nitrogen concentration in ryegrass (*Lolium* spp.) pasture using the chlorophyll red-edge: Theoretical modeling and experimental observations[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 23(18): 3619-3648.
- Le Maire G, François C, Dufrêne E. 2004. Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 89(1): 1-28.
- Liang S L. 2004. *Quantitative remote sensing of land surfaces* [M]. Hoboken: Wiley & Sons.
- Lichtenhaler H K. 1998. The stress concept in plants: An introduction[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 851: 187-198.
- Ma Z G, Chen X, Wang Q, et al. 2012. Retrieval of leaf biochemical properties by inversed PROSPECT model and hyperspectral indices: An application to *Populus euphratica* polymorphic leaves[J]. *Journal of Arid Land*, 4(1): 52-62.
- Newnham G J, Burt T. 2001. Validation of a leaf reflectance and transmittance model for three agricultural crop species[C]//*Proceedings of IEEE 2001 international geoscience and remote sensing symposium*, 2001. IGARSS'01. Sydney, NSW: IEEE, 7: 2976-2978.
- Ni J. 2002. Carbon storage in grasslands of China[J]. *Journal of Arid Environments*, 50(2): 205-218.
- Niinemets Ü, Tenhunen J D. 1997. A model separating leaf structural and physiological effects on carbon gain along light gradients for the shade-tolerant species *Acer saccharum*[J]. *Plant, Cell & Environment*, 20(7): 845-866.
- Peñuelas J, Filella I. 1998. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status [J]. *Trends in Plant Science*, 3(4): 151-156.
- Pinar A, Curran P J. 1996. Technical note grass chlorophyll and the reflectance red edge[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 17(2): 351-357.
- Pu R L, Gong P, Biging G S, et al. 2003. Extraction of red edge optical parameters from Hyperion data for estimation of forest leaf area index[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4): 916-921.
- Richardson A D, Duigan S P, Berlyn G P. 2002. An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content[J]. *New Phytologist*, 153(1): 185-194.
- Rock B N, Hoshizaki T, Miller J R. 1988. Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline[J]. *Remote Sensing of Environment*, 24(1): 109-127.
- Rondeaux G, Steven M, Baret F. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices[J]. *Remote Sensing of Environment*, 55(2): 95-107.
- Si Y L, Schlerf M, Zurita-Milla R, et al. 2012. Mapping spatio-temporal variation of grassland quantity and quality using MERIS data and the PROSAIL model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 121: 415-425.
- Sims D A, Gamon J A. 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages[J]. *Remote Sensing of Environment*, 81(2-3): 337-354.
- Sims D A, Luo H Y, Hastings S, et al. 2006. Parallel adjustments in vegetation greenness and ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in response to drought in a Southern California chaparral ecosystem[J]. *Remote Sensing of Environment*, 103(3): 289-303.
- Smith K L, Steven M D, Colls J J. 2004. Use of hyperspectral derivative ratios in the red-edge region to identify plant stress responses to gas leaks[J]. *Remote Sensing of Environment*, 92(2): 207-217.
- Thomas J R, Gausman H W. 1977. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops [J]. *Agronomy Journal*, 60(5): 799-802.
- Tucker C J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 8(2): 127-150.
- Ustin S L, Jacquemoud S, Zarco-Tejada P J, et al. 2004. Remote sensing of environment: State of the science and new directions[M]//Ustin S L. *Remote sensing for natural resource management and environmental monitoring: Manual of remote sensing vol. 4*. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons, 679-730.
- Verhoef W. 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 16(2): 125-141.
- Vohland M, Jarmer T. 2008. Estimating structural and bio-

- chemical parameters for grassland from spectroradiometer data by radiative transfer modelling (PROSPECT + SAIL) [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 29 (1): 191-209.
- Vuolo F, Dash J, Curran P J, et al. 2012. Methodologies and uncertainties in the use of the terrestrial chlorophyll index for the Sentinel-3 mission[J]. *Remote Sensing*, 4(5): 1112-1133.
- Wong K K, He Y H. 2013. Estimating grassland chlorophyll content using remote sensing data at leaf, canopy, and landscape scales[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing: Journal Canadien de Télédétection*, 39(2): 155-166.
- Wright I J, Reich P B, Westoby M, et al. 2004. The worldwide leaf economics spectrum[J]. *Nature*, 428: 821-827.
- Wu C Y, Niu Z, Tang Q, et al. 2008. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(8-9): 1230-1241.
- Yoder B J, Pettigrew-Crosby R E. 1995. Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400-2500 nm) at leaf and canopy scales[J]. *Remote Sensing of Environment*, 53(3): 199-211.
- Zhang Y Q, Chen J M, Miller J R, et al. 2008. Leaf chlorophyll content retrieval from airborne hyperspectral remote sensing imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 112(7): 3234-3247.

## Progress on grassland chlorophyll content estimation by hyperspectral analysis

MA Wenyong, WANG Xunming\*

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** As the key pigment for photosynthesis, chlorophyll is closely related to nitrogen, protein, moisture, and other biochemical parameters of vegetation. Chlorophyll is a good indicator for photosynthesis activity and physiological state of grasslands. Hyperspectral analysis is a powerful means for accurately retrieving grassland chlorophyll contents in large areas. Based on the existing methods for monitoring grassland chlorophyll contents, this article summarizes and groups such methods into two categories: empirical models of red edge position (REP) / spectral indices, and radiative transfer models. With statistical analysis of the relationships between chlorophyll contents and REP/ spectral indices, empirical models were extensively employed for estimating grassland chlorophyll contents. These models use simple parameters and the REP that is closely related to grassland chlorophyll contents can be conveniently calculated. Due to the diverse structural forms of the spectral indices and the complicated relationships between spectral indices and chlorophyll contents, accuracy of chlorophyll content estimation is still limited, although novel algorithms of REP calculation and, to a lesser extent, new spectral indices, have significantly improved the estimation accuracy of grassland chlorophyll contents. Based on the relationships of chlorophyll contents and radiation energy, radiative transfer models were founded. Multiple parameters are required in the models, which are highly sensitive to the scale of estimation, and these models need to be further improved. Currently there exist few studies on grassland chlorophyll content estimation and only very few models have been developed for grassland chlorophyll content estimation. Future research should focus on developing new indices or improving existing indices and determining appropriate parameters of radiative transfer models to achieve better results for grassland application. In addition, current studies are limited to leaf and canopy scale analyses, and therefore expanding grassland chlorophyll content estimation to the landscape scale will be an important and challenging task.

**Key words:** hyperspectral analysis; grassland chlorophyll; red edge position; spectral index; radiative transfer model