水分敏感的反射光谱指数比较研究——以锐齿槲栎为例

刘 畅 孙鹏森* 刘世荣

中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

摘 要 利用叶片反射光谱实时、无损地探测植物水分状况是森林干旱评估的新方法, 但是不同光谱指数的水分敏感性存在很大差异, 因此, 确定适用于树木叶片的水分指标与其敏感的光谱指标均非常重要。该研究选取锐齿槲栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)不同发育阶段和冠层位置上的叶片作为研究对象, 在失水条件下, 测定叶片的水分指标及其同步的反射光谱响应曲线, 探究叶片的光谱反射率变化与水分状况改变的关系, 比较并评估不同叶片发育阶段和冠层位置叶片的水分指标与不同反射光谱指数之间相关关系的优劣。结果表明: (1)在4个不同水分指标中, 与比叶含水量(*SWC*)和叶片水分鲜质量比(*LMP*)相比, 相对含水量(*RWC*)和等效水分厚度(*EWT*)在不同发育阶段和冠层位置之间的变异性更小, 能稳定地表征树木整体的水分状况; 且*RWC*和*EWT*具有更高的光谱敏感性, 适用于遥感探测。(2)光谱反射率差值分析法和光谱反射率敏感性分析法表明: 叶片的光谱敏感性受发育阶段的影响较大; 在短波红外区域, 成熟叶片在失水胁迫初始阶段的光谱变化较小, 而新展叶在整个失水阶段均表现出明显的光谱差异。(3)通过对15个不同光谱指数与水分指标的相关分析, 发现水分指数(*WI*)-*RWC*和双差值指数($DD_{n(1530,525)}$)-*EWT*均具有较高的相关性, 其中, *WI*-*RWC*的拟合关系受叶片发育阶段和冠层位置的影响较大; 而 $DD_{n(1530,525)}$ -*EWT*的拟合关系更为稳定。

关键词 反射光谱指数; 锐齿槲栎; 叶片失水; 发育阶段; 冠层位置

引用格式: 刘畅, 孙鹏森, 刘世荣 (2017). 水分敏感的反射光谱指数比较研究——以锐齿槲栎为例. 植物生态学报, 41, 850–861. doi: 10.17521/cjpe.2016.0095

A comparison of spectral reflectance indices in response to water: A case study of *Quercus aliena* var. *acuteserrata*

LIU Chang, SUN Peng-Sen*, and LIU Shi-Rong

Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Beijing 100091, China

Abstract

Aims Using leaf spectral reflectance to detect plant status in real time and non-destructively is a new method of forest drought assessment, but each spectral index possesses considerable moisture sensitivity. Therefore, determining moisture index applicable to tree leaf and its sensitive spectral index are both very important.

Methods This study selected *Quercus aliena* var. *acuteserrata* leaves in different growth stages and canopy positions as the research object, and measured leaf moisture index and its synchronous reflectance spectral response curve during the dehydration process, explored the relationship between changes of leaf spectral reflectance and water status, compared and evaluated the advantages and disadvantages of correlation between the moisture indices of leaves in different growth stages and space positions and different spectral reflectance indices.

Important findings Results indicated: (1) The variability of relative water content (*RWC*) and equivalent water thickness (*EWT*) in different growth stages and canopy positions was smaller than specific leaf water content (*SWC*) and leaf moisture percentage on fresh quality (*LMP*) as measured by the four different moisture indices. *RWC* and *EWT* could steadily characterize the holistic water status of trees, and they had greater spectral sensitivity. Therefore, they were suitable for application in remote sensing detection. (2) Spectral reflectance difference analysis and spectral reflectance sensitivity analysis showed that the leaf spectral sensitivity is strongly influenced by growth stage. In short wave infrared region, spectral reflectance of mature leaves changed slightly in the initial stage of dehydration stress, but new expanded leaves showed obvious spectral differences during the dehydration

process. (3) Through the correlation analysis between 15 different spectral indices and moisture indices, we found that water index (WI)- RWC and double difference index ($DD_{n(1530,525)}$)- EWT has higher correlation. The fitted relations of WI - RWC are greatly influenced by leaf growth stage and canopy position, while those of $DD_{n(1530,525)}$ - EWT are more stable.

Key words spectral reflectance indices; *Quercus aliena* var. *acuteserrata*; leaf dehydration; growth stage; canopy position

Citation: Liu C, Sun PS, Liu SR (2017). A comparison of spectral reflectance indices in response to water: A case study of *Quercus aliena* var. *acuteserrata*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 850–861. doi: 10.17521/cjpe.2016.0095

水分是植物体的重要组成成分,植物的各项生理活动都必须在水的参与下才能进行。有研究表明,叶片含水量降低会影响叶片光系统II (PSII)的电子传递速率和叶片的光化学效率(Augusti *et al.*, 2001),降低植物的光合碳同化速率(Lawlor & Cornic, 2002),叶片水分亏缺严重时还将引起植物碳饥饿或液压失效,进而导致植物死亡(McDowell *et al.*, 2008, 2013; Sevanto *et al.*, 2014)。

遥感是一种非损伤性的获得被测物体信息的手段,高光谱遥感在生态学上的应用扩展了我们认识植被的能力,使我们能够由简单的识别植被“是什么”逐步发展到定量化估测植被“怎么样”的更高水平(Muttiah, 2002)。利用反射光谱探测植物的生理生态活动是定量遥感新的发展方向。目前国内外对植被的反射光谱与其生理生态参数之间的关系已经有一定的研究和认识,在利用遥感技术对植被生态水文学的观测中,水分变化引起的植被反射光谱的变化最为常见,也最为复杂(杜朋选等, 2011)。

植物在近红外和短波红外区域吸收电磁辐射的特征变化主要是水分子和其他分子中的O—H键的伸缩和弯曲振动引起的,其吸收的峰值分别位于970、1 145、1 400和1 940 nm (Curran, 1989),因此,叶片水分状况的变化能够导致这些区域相当广泛的光谱变化。基于光谱反射率数据的模型反演(Jacquemoud *et al.*, 1996)和光谱指数(Ceccato *et al.*, 2001)是估测叶片水分状况中普遍应用的两种遥感方法。与模型反演相比,基于几个窄的或宽的光谱波段组合的光谱指数方法既简单又与叶片水分状况具有良好的相关性,因此,如何利用遥感数据设计一个通用的光谱指数来估算植被水分状况引起了更多的关注(Ceccato *et al.*, 2002a, 2002b; le Maire *et al.*, 2008)。Aoki等(1988)在研究中指出对于木本植物来说,单位面积叶片水分含量(LWC)与 R_{1650}/R_{1430} 的反射率比值有紧密的关系。Peñuelas等(1993)用970 nm的水分敏感波段和900 nm处的光谱反射率构建了

水分指数(WI),并验证了 WI 在预测叶片水分胁迫方面的有效性。Gao (1996)在研究中发现1 240 nm处的光谱特征峰对水分含量变化非常敏感,而860 nm处则非常不敏感,故由此提出归一化水分指数($NDWI$)。Peñuelas和Inoue (1999)的研究表明, WI 与 $NDVI$ 的比值($WI/NDVI$)在预测叶片的水分含量的基础上,还可以用来预测植株的含水量或水势。Yu等(2000)用比叶含水量(SWC)、叶片水分鲜质量比(LMP)、相对含水量(RWC)和 LWC 等水分指标表征草本和木本树种叶片的水分状况,进而建立了叶片反射光谱和水分状况之间的关系。田永超等(2004, 2006)在对不同水分条件小麦(*Triticum aestivum*)和水稻(*Oryza sativa*)的研究中发现 $SR_{(610,560)}/ND_{(810,610)}$ 和 $SR_{(760,1650)}$ 与其水分指标的相关性最好。为了找出能把水分胁迫与其他生物胁迫区分开来的光谱波段或光谱组合, Graeff和Claupein (2007)对不同水分处理下小麦叶片的反射光谱数据进行分析,发现在小麦整个生长期510–780 nm (波长范围为510–780 nm的光谱反射率,下同)、540₇₈₀ nm、490₁₃₀₀ nm和540₁₃₀₀ nm波段最适合来表示小麦叶片的水分状况。Sun等(2008)在水分胁迫对橄榄(*Canarium album*)叶的反射光谱和生理参数影响的研究中提出了水分含量反射率指数($WCRI$),并探讨了 $WCRI$ 与 RWC 之间的关系。Osório等(2012)对不同温度和水分组合条件下长角豆(*Ceratonia siliqua*)幼苗的研究表明,与叶片水势和 RWC 相比,长角豆叶片的水浓度(WC)和 WI 的相关性更高。Cao等(2015)通过5个树种叶片的失水试验发现双差值指数($DD_{n(1530,525)}$)与叶片 RWC 和 EWT 的关系良好且稳定。Caturegli等(2015)在对高羊茅(*Festuca arundinacea*)的研究中发现不同水分条件下 WI 对水分状况的预测精确度高于 $NDWI$ 等其他光谱指数。Gerhards等(2016)在对马铃薯(*Solanum tuberosum*)植株的研究中测定并分析了作物缺水指数($CWSI$)、水分胁迫指数(MSI)和光化学反射指数(PRI)等光谱指数与水分胁迫的关系,发现基于近红

doi: 10.17521/cjpe.2016.0095

外光谱与短波红外光谱反射率比值(*NIR/SWIR*)的光谱指数与植物含水量的关系最好。Zhao等(2016)的研究表明*NDWI*、简单比值指数(*SR*)和短波红外垂直水分胁迫指数(*SPSI*)与冬小麦叶片水分含量的相关性显著,其中,*NDWI*和*SR*与叶片含水量的相关性高于*SPSI*。以上可见,当前植物水分状况相关的反射光谱指数众多,但有关植物水分状况与现有反射光谱指数关系敏感性的系统比较研究较少,而认清究竟哪些反射光谱指数在探测植物叶片水分状况的变化中更为直接和有效,对于短时期内快速、实时评估树木的干旱与水分胁迫状态具有重要意义。

通常来说,模拟高强度水分胁迫条件下的野外试验中,植物叶片的物理结构和生理活动都受到了很大的影响,此时获得的光谱指数无法纯粹地反映植物叶片的水分状况;而以往的研究表明,叶片失水试验可以提供大范围的水分变化条件,这比野外试验更适于光谱指数的识别(Carter, 1991; Peñuelas *et al.*, 1993, 1997; Seelig *et al.*, 2008)。本研究依托宝天曼森林生态系统定位研究站,在我国暖温带与亚热带过渡区的锐齿槲栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)林开展试验,和长期干旱引起的植物复杂的生理、结构响应变化不同,本研究模拟植物叶片快速失水过程,突出叶片水分状况的单一变化对反射光谱的影响,为进一步利用高光谱信息识别植被的水分状况提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

宝天曼国家级自然保护区(33.42°–33.55° N, 111.88°–112.00° E)位于河南省西南部,地处秦岭东段和伏牛山南坡,最高峰海拔1 830 m,总面积约53.4 km²,总辐射量平均为455.34 kJ·cm⁻²,年平均气温15.1 °C,1月平均气温1.5 °C,7月平均气温27.8 °C;年降水量885.6 mm,多集中分布于6–8月的雨季,年蒸发量991.6 mm,年平均相对湿度为68%。植被以暖温带落叶阔叶林为主,兼有北亚热带常绿落叶阔叶混交林的特点,栎类物种约占宝天曼乔木树种的70%,是当地主要建群树种(史作民等, 1999)。

1.2 试验方法

1.2.1 样品采集

试验于2014年8月和2015年5月两个不同发育阶段进行,研究对象为宝天曼生态定位站后南坡

(坡度约25°)上的锐齿槲栎中龄次生林(高约25 m)。采样选取了4株生长健康的锐齿槲栎样本树,在树顶部和下部位置分别选取1枝南朝向的枝条剪下,将采集到的枝条样本迅速放到装有冰袋的保温箱内低温保鲜并立即带回生态站实验室(约20 min),每一枝条选取3片叶用于测定反射光谱和水分状况指标。两次试验锐齿槲栎样本树相同。

1.2.2 人工模拟叶片快速失水

本试验利用离体植物叶片自然失水的方法来改变叶片的水分状况。即在室温下,将选好的锐齿槲栎叶片在叶片基部从枝条上剪下来,展开平铺在通风的试验台上,使其在自然条件下散失水分,然后按照一定的时间间隔,同步测定叶片的水分指标和反射光谱响应曲线。

1.2.3 叶片水分指标的测定

首先采用1/1000天平称出叶片的鲜质量并做好记录(*FM*),然后在叶片自然失水处理第1、2、3、4、5、8 h测定其反射光谱并称质量记录(*M_T*, *T* = 1, 2, 3, 4, 5, 8; *M₀* = *FM*),之后将叶片浸在去离子水中6 h,使其充分吸水,称其饱和吸水质量(*SM*),在称质量过程中同步测定叶片样本的面积(*LA*),最后将称质量后的叶片放入烘箱内105 °C高温杀青30 min,之后保持65 °C的温度烘干至恒质量,称干质量并记录(*DM*),分别计算样品的*SWC*、*LMP*、*RWC*和等效水分厚度(*EWT*)。

$$SMC = (M_T - DM)/DM$$

$$LMP = (M_T - DM)/M_T$$

$$RWC = (M_T - DM)/(SM - DM)$$

$$EWT (g \cdot m^{-2}) = (M_T - DM)/LA$$

1.2.4 叶片反射光谱的测定和处理

叶片的反射光谱曲线测定:每次锐齿槲栎叶片称质量后,采用ASD FieldSpec 4地物光谱辐射仪(*Analytica Spectra Devices*, Boulder, USA)自带的手持叶夹式叶片光谱探测器测定叶片的反射光谱曲线,测量时将叶片擦净展平置于叶片夹的叶室中,使用探测器的内置稳定光源测定。每一叶片测定反射光谱5次,取其平均值作为这一叶片的反射光谱测量值。光谱测量范围为350–2 500 nm,光谱采样间隔在350–1 025 nm区间为1.4 nm,在1 025–2 500 nm区间内为2 nm,每组数据测量前均进行标准白板校正。

反射光谱处理:为清晰地描述不同发育阶段和冠层位置的锐齿槲栎叶片在失水过程中的光谱反射

率变化特征, 本研究中使用3种不同的方法(原始光谱反射率、反射率差值和反射率敏感性)来处理获得的不同锐齿槲栎叶片样本的光谱反射率。

反射率差值(Reflectance difference) = $R_T - R_F$

反射率敏感性(Reflectance sensitivity) =

$$(R_T - R_F)/R_F$$

其中, R_T 和 R_F 分别代表失水 T h后和新鲜叶片的光谱反射率。

1.2.5 水分相关的光谱指数

许多基于几个或多个光谱波段组合构建的高光谱指数已经被开发出来估测植株的水分状况。本研究中, 选择前人研究中具有代表性的15个光谱指标, 来测试其在叶片失水过程中监测叶片水分状况的表现(表1)。

1.3 数据处理与分析

本研究测得的叶片的水分状况指标使用Excel 2013软件进行平均值、标准偏差求算等处理; 叶片的光谱反射率使用ASD公司提供的ViewSpec Pro软件进行光谱曲线平均化和数据导出等处理; 最后使用SPSS 19.0和SigmaPlot 12.5软件对所有数据统计分析和制图。

2 结果和分析

2.1 水分散失过程中叶片水分指标的变化

表2显示了本试验锐齿槲栎叶片样本在试验前

的水分状况(SWC 、 LMP 、 RWC 和 EWT)的统计结果, 不同发育阶段和冠层位置的叶片样本的 SWC 、 LMP 、 RWC 和 EWT 均存在一定的差异, 说明样本具有较好的代表性。

图1显示的是失水过程中不同发育阶段和冠层位置的锐齿槲栎叶片的水分指标随时间的变化。可以看出, 叶片离体后, 由于没有外来水分的补给, 加之叶片自身生理活动的消耗, 水分胁迫的强度越来越大, 锐齿槲栎叶片的 SWC 、 LMP 、 RWC 和 EWT 不同程度地下降。在失水过程中, 新展叶的 SWC 和 LMP 始终显著大于成熟叶, 同一时期下部叶的 SWC 和 LMP 整体上大于顶部叶, SWC 和 LMP 在不同发育阶段和冠层位置上的变异很大(图1A、1B)。而与 SWC 和 LMP 相比, RWC 和 EWT 在不同发育阶段和冠层位置上的变异则相对较小(图1C、1D)。

2.2 不同水分状况下叶片反射光谱的变化特征

与多数绿色植物一样, 锐齿槲栎在可见光区的550–560 nm有一个明显的反射峰, 680–690 nm光谱反射率迅速降低形成一个反射谷; 700–770 nm叶片的光谱反射曲线陡然上升, 在近红外区域的770–1 300 nm波段形成了一个明显的反射平台; 而在短波红外区域的1 400–2 500 nm波段则出现了两个反射峰和两个反射谷。不同发育阶段和冠层位置锐齿槲栎叶片在失水过程中反射光谱变化存在一定的差异。图2显示随着叶片水分的持续散失, 锐齿槲栎叶片样本

表1 水分状况相关的反射光谱指数及其定义

Table 1 Reflectance spectral indices related to water status and their definitions

反射光谱指数 Spectral reflectance index	缩写 Acronym	定义 Definition	参考文献 Reference
水分指数 Water index	WI	R_{900}/R_{970}	Peñuelas <i>et al.</i> , 1993
水分指数/归一化植被指数 Water index/normalized difference vegetation index	WI/NDVI	$(R_{900}/R_{970})/[(R_{900}-R_{680})/(R_{900}+R_{680})]$	Peñuelas & Inoue, 1999
水分胁迫指数 Moisture stress index	MSI	R_{820}/R_{1600}	Hunt & Rock, 1989
简单比值指数 Simple ratio index _(760,1650)	SR _(760,1650)	R_{760}/R_{1650}	Tian <i>et al.</i> , 2006
简单比值指数 Simple ratio index _(1300,1450)	SR _(1300,1450)	R_{1300}/R_{1450}	Seelig <i>et al.</i> , 2008
简单比值水分指数 Simple ratio water index	SRWI	R_{860}/R_{1240}	Zarco-Tejada <i>et al.</i> , 2003
归一化红外指数 Normalized difference infrared index	NDII	$(R_{850}-R_{1650})/(R_{850}+R_{1650})$	Hardisky <i>et al.</i> , 1983
归一化水分指数 Normalized difference water index	NDWI	$(R_{860}-R_{1240})/(R_{860}+R_{1240})$	Gao, 1996
水分含量反射指数 Water content reflectance index	WCRI	$R_{1455}/(R_{1272}-R_{1455})$	Sun <i>et al.</i> , 2008
三波段复合指数 Three-band composite index	SR _{(610,560)/ND_(810,610)}	$(R_{610}/R_{560})/[(R_{810}-R_{610})/(R_{810}+R_{610})]$	Tian <i>et al.</i> , 2004
四波段干旱指数 Four bands drought index	SR _{(1640,2130)/ND_(855,555)}	$(R_{1640}/R_{2130})/[(R_{855}-R_{555})/(R_{855}+R_{555})]$	Zhang & Guo, 2006
归一化多波段干旱指数 Normalized multi-band drought index	NMDI	$[(R_{860}-(R_{1640}-R_{2130})]/[R_{860}+(R_{1640}+R_{2130})]$	Wang & Qu, 2007
三波段比值指数 Three-band ratio index ₉₇₅	Ratio ₉₇₅	$2R_{960-990}/(R_{920-940}+R_{1090-1110})$	Pu <i>et al.</i> , 2003
三波段比值指数 Three-band ratio index ₁₂₀₀	Ratio ₁₂₀₀	$2R_{1180-1220}/(R_{1090-1110}+R_{1265-1285})$	Pu <i>et al.</i> , 2003
双差值指数 Double difference index	DD _{n(1530, 525)}	$2R_{1530}-R_{1005}-R_{2055}$	Wang & Li, 2012

R_{λ} , λ nm的光谱反射率; $R_{\lambda_1-\lambda_2}$, λ_1 – λ_2 nm光谱反射率的平均值。

R_{λ} , spectral reflectance of λ nm; $R_{\lambda_1-\lambda_2}$, mean of spectral reflectance of λ_1 – λ_2 nm.

表2 不同发育阶段和冠层位置的叶片样本失水前的水分状况
Table 2 Water status of leaf samples at different developmental stages and canopy position before dehydration

样本 Sample	水分相关变量 Variables related to water	样本数 Number of sample	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	平均值 Mean value	标准偏差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation (%)
顶部新展叶 Top new expanded leaf	SWC	12	2.24	2.06	2.15	0.07	3.11
	LMP	12	0.69	0.67	0.68	0.01	0.99
	RWC	12	0.94	0.90	0.92	0.01	1.12
	EWT	12	93.40	87.40	90.60	1.81	2.00
下部新展叶 Bottom new expanded leaf	SWC	12	2.49	2.31	2.39	0.07	3.11
	LMP	12	0.73	0.71	0.72	0.01	0.99
	RWC	12	0.94	0.90	0.92	0.01	1.22
	EWT	12	97.80	91.60	94.90	1.90	2.00
顶部成熟叶 Top mature leaf	SWC	12	1.36	1.20	1.28	0.05	4.21
	LMP	12	0.58	0.55	0.56	0.01	1.85
	RWC	12	0.96	0.93	0.94	0.01	0.87
	EWT	12	88.00	82.20	85.00	2.02	2.38
下部成熟叶 Bottom mature leaf	SWC	12	1.76	1.52	1.65	0.07	4.46
	LMP	12	0.65	0.62	0.63	0.01	1.73
	RWC	12	0.96	0.93	0.95	0.01	0.91
	EWT	12	98.30	93.10	95.50	1.92	2.01

EWT, 等效水分厚度; LMP, 叶片水分鲜质量比; RWC, 相对含水量; SWC, 比叶含水量。
EWT, equivalent water thickness; LMP, leaf moisture percentage on fresh quality; RWC, relative water content; SWC, specific leaf water content.

图1 失水过程中不同发育阶段和冠层位置的锐齿槲栎叶片的比叶含水量(A)、叶片水分鲜质量比(B)、相对含水量(C)和等效水分厚度(D)的变化(平均值±标准偏差)。
Fig. 1 Changes of specific leaf water content (A), leaf moisture percentage on fresh mass (B), relative water content (C), and equivalent water thickness (D) of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* leaves in different growth stages and canopy positions during the dehydration process (mean ± SD).

的光谱反射率在可见光区的变化均较小,而在近红外区域和短波红外区域发生了较为明显的变化。与原始反射光谱(图2A)相比,光谱反射率差值分析法(图2B)和反射率敏感性分析法(图2C)能提供叶片在失水过程中更详细的光谱变化信息。由图2B可以看出,不同叶片样本在955–970 nm、1 400–1 500 nm、1 650–1 750 nm、1 940–1 960 nm和2 055–2 400 nm波段的光谱反射率随叶片水分的散失而均明显增加;

由图2C可以看出,叶片在可见光区光谱反射率变化的规律性较差,而在短波红外区域以1 455 nm、1 950 nm和2 480 nm为中心波段的光谱区则与失水时间呈现明显的负相关关系。对比来看,成熟叶在失水过程中可见光区的光谱反射率变化更小,且在短波红外区域成熟叶在前几个小时的失水过程中的光谱变化也明显小于新展叶,当达到一定水分胁迫程度后,反射率才出现更明显的变化。不同水分条

图2 失水过程中不同发育阶段和冠层位置锐齿槲栎叶片的原始光谱反射率、反射率差值和反射率敏感性变化。

Fig. 2 Changes of original spectral reflectance, reflectance differences and reflectance sensitivities of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* leaves in different growth stages and canopy positions during the dehydration process.

件下叶片光谱反射率的这种变化规律为利用反射光谱指数探测锐齿槲栎叶片的水分状况奠定了基础。

2.3 叶片的水分指标与光谱反射率的相关性

植物叶片水分状况的光谱探测是以叶片水分敏感的光谱反射率与水分指标的相关关系为基础的。本研究为了更好地反映反射光谱对锐齿槲栎叶片水分状况变化的敏感性,选取水分敏感的叶片光谱反射率与水分指标(*SWC*、*LMP*、*RWC*和*EWT*)进行了总体相关性分析(图3)。结果显示,新展叶在可见光区480–650 nm波段的光谱反射率与水分指标呈现负相关关系,相关性最好的波段在555 nm附近,但相关性都没有达到显著水平($r < 0.2$);成熟叶在可见光区的光谱反射率与水分指标的相关性很差。在近红外区域的740–855 nm波段,新展叶的光谱反射率与*SWC*、*LMP*、*RWC*和*EWT*呈现显著的正相关关系,且均达到了0.01的显著性水平,780 nm处下部新展叶的反射率与*RWC*的相关性最高($r = 0.45$)(图3A、3C);成熟叶的光谱反射率与*SWC*、*LMP*、*RWC*和*EWT*呈现正相关关系,且反射率与*SWC*、*LMP*和*EWT*的相关性达到了0.05的显著性水平,760 nm处下部成熟叶的反射率与*LMP*的相关性最高($r = 0.39$)(图3B、3D)。在短波红外区域的1 220–2 130 nm波段,新展叶的光谱反射率与*SWC*、*LMP*、*RWC*和*EWT*呈现显著的负相关关系,且均达到了0.01的显著性水平(图3A、3C);其中,1 455 nm处顶部新展叶的反射率与*RWC*的相关性最高($r = 0.58$)(图3A);在1 420–1 540 nm波段,成熟叶的光谱反射率与水分指标呈现显著的负相关关系,且均达到了0.05的显著性水平,且反射率与*RWC*和*EWT*的相关性达到了0.01的显著水平(图3B、3D);其中,1 455 nm处顶部成熟叶的反射率与*RWC*的相关性最高($r = 0.56$)(图3B)。

2.4 不同反射光谱指数与水分指标相关性的差异

本研究将选取的15个反射光谱指数分别与不同发育阶段和冠层位置叶片样本的水分状况指标(*SWC*、*LMP*、*RWC*和*EWT*)进行相关分析,相关系数结果见表3。

2.4 不同反射光谱指数与水分指标相关性的差异

从表3可以看出,选取的光谱指数中只有 $SR_{(1640,2130)}/ND_{(855,555)}$ 、 $Ratio_{975}$ 和 $Ratio_{1200}$ 与部分锐齿槲栎叶片样本水分指标的相关关系没有达到显著水平,其他光谱指数与不同叶片所有水分指标的相关关系均达到了显著或极显著水平。相比于*SWC*和*LMP*,多数光谱指数与不同发育阶段、不同冠层位

图3 顶部新展叶(A)、顶部成熟叶(B)、下部新展叶(C)和下部成熟叶(D)的不同水分指标与敏感反射光谱波段的相关性。*EWT*, 等效水分厚度; *LMP*, 叶片水分鲜质量比; *SWC*, 比叶含水量; *RWC*, 相对含水量。

Fig. 3 Correlations of different moisture indices of top new expanded leaf (A), top mature leaf (B), bottom new expanded leaf (C), and bottom mature leaf (D) and their sensitive reflectance spectral bands. *EWT*, equivalent water thickness; *LMP*, leaf moisture percentage on fresh quality; *SWC*, specific leaf water content; *RWC*, relative water content.

表3 不同反射光谱指数与锐齿槲栎叶片水分指标的相关性

Table 3 Correlation between different reflectance spectral indices and water indices of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* leaf

反射光谱指数 Reflectance spectral index	下部新展叶 Bottom new expended leaf				顶部新展叶 Top new expended leaf				下部成熟叶 Bottom mature leaf				顶部成熟叶 Top mature leaf			
	SWC	LMP	RWC	EWT	SWC	LMP	RWC	EWT	SWC	LMP	RWC	EWT	SWC	LMP	RWC	EWT
水分指数 Water index	0.751**	0.751**	0.836**	0.801**	0.831**	0.830**	0.894**	0.867**	0.678**	0.685**	0.876**	0.806**	0.708**	0.713**	0.818**	0.776**
水分指数/归一化植被指数 Water index/ normalized difference vegetation index	0.400**	0.401**	0.439**	0.432**	0.413**	0.415**	0.457**	0.465**	0.372**	0.376**	0.626**	0.634*	0.553**	0.556**	0.594**	0.602**
水分胁迫指数 Moisture stress index	0.411**	0.412**	0.493**	0.336**	0.401**	0.403**	0.483**	0.330**	0.251*	0.253*	0.633**	0.471**	0.338**	0.340**	0.603**	0.475**
简单比值指数 Simple ratio index _(760,1650)	0.491**	0.494**	0.565**	0.463**	0.462**	0.465**	0.505**	0.393**	0.283*	0.285*	0.682**	0.550**	0.404**	0.406**	0.655**	0.536**
简单比值指数 Simple ratio index _(1300,1450)	0.366**	0.364**	0.601**	0.726**	0.385**	0.386**	0.612**	0.732**	0.421**	0.426**	0.716**	0.811**	0.488**	0.495**	0.708**	0.808**
简单比值水分指数 Simple ratio water index	0.722**	0.722**	0.798**	0.736**	0.771**	0.773**	0.829**	0.786**	0.619**	0.617**	0.801**	0.695**	0.663**	0.665**	0.756**	0.732**
归一化红外指数 Normalized difference infrared index	-0.363**	-0.363**	-0.477**	-0.373**	-0.377**	-0.375**	-0.472**	-0.395**	-0.217*	-0.219*	-0.631**	-0.465**	-0.317**	-0.319**	-0.577**	-0.452**
归一化水分指数 Normalized difference water index	0.715**	0.717**	0.787**	0.726**	0.763**	0.764**	0.824**	0.777**	0.621**	0.623**	0.808**	0.697**	0.664**	0.667**	0.758**	0.733**
水分含量反射指数 Water content reflectance index	-0.312**	-0.315**	-0.510**	-0.485**	-0.306**	-0.308**	-0.503**	-0.465**	-0.356**	-0.359**	-0.600**	-0.468**	-0.331**	-0.336**	-0.584**	-0.461**
三波段复合指数 Three-band composite index	-0.426**	-0.428**	-0.469**	-0.485**	-0.422**	-0.423**	-0.466**	-0.473**	-0.486**	-0.505**	-0.529**	-0.535**	-0.568**	-0.577**	-0.578**	-0.592**
四波段干旱指数 Four bands drought index	0.463**	0.466**	0.496**	0.382**	0.456**	0.459**	0.485**	0.367**	0.163	0.164	0.414**	0.193	0.023	0.024	0.364**	0.176
归一化多波段干旱指数 Normalized multi-band drought index	0.571**	0.574**	0.793**	0.796**	0.553**	0.550**	0.807**	0.811**	0.531**	0.533**	0.788**	0.797**	0.536**	0.536**	0.781**	0.783**
三波段比值指数 Three-band ratio index ₉₇₅	-0.127	-0.129	-0.398**	-0.309**	-0.143	-0.145	-0.421**	-0.316**	-0.182*	-0.185*	-0.600**	-0.416**	-0.302**	-0.305**	-0.585**	-0.431**
三波段比值指数 Three-band ratio index ₁₂₀₀	-0.093	-0.096	-0.355**	-0.202*	-0.085	-0.088	-0.322**	-0.182	-0.103	-0.106	-0.565**	-0.382**	-0.233*	-0.236*	-0.537**	-0.379**
双差值指数 Double diff- erence index	0.636**	0.634**	0.734**	0.835**	0.650**	0.651**	0.728**	0.857**	0.621**	0.625**	0.727**	0.852**	0.608**	0.609**	0.736**	0.821**

*, 在0.05水平上显著相关; **, 在0.01水平上显著相关。EWT, 等效水分厚度; LMP, 叶片水分鲜质量比; SWC, 比叶含水量; RWC, 相对含水量。

*, correlation is significant at 0.05 level; **, correlation is significant at 0.01 level. EWT, equivalent water thickness; LMP, leaf moisture percentage on fresh quality; SWC, specific leaf water content; RWC, relative water content.

置叶片RWC和EWT的相关关系更好, 这表明RWC和EWT具有更好的光谱敏感性, 更适于在光谱探测中表征植物的水分状况。*WI*、*SRWI*、*NDWI*、*NMDI*和 $DDn_{(1530,525)}$ 与不同发育阶段、不同冠层位置叶片的RWC和EWT的相关关系明显优于其他指数($r \geq 0.727$), 其中, *WI*与锐齿槲栎叶片RWC的相关性最好($r \geq 0.818$), 尽管*WI*与顶部新展叶EWT的相关关系达到了0.867, 但*WI*与EWT的相关关系的稳定性不及 $DDn_{(1530,525)}$ ($r \geq 0.821$)。从叶片的发育阶段看, *WI*、*SRWI*、*NDWI*、*NMDI*和 $DDn_{(1530,525)}$ 与新展叶RWC和EWT的相关性略优于成熟叶; 而从叶片冠层位置看, 样本则没有表现出一致性的规律。

基于本次试验的水分和光谱数据, 图4展示了不同发育阶段、不同冠层位置锐齿槲栎叶片*WI*-RWC和 $DDn_{(1530,525)}$ -EWT的线性拟合关系。可以看出, 相同冠层位置锐齿槲栎叶片的RWC与*WI*在叶片成熟前后的拟合关系相差较大; 不同冠层位置新展叶的RWC-*WI*的拟合关系在叶片成熟前后相差较小, 不同冠层位置成熟叶的RWC与*WI*的拟合关系在叶片成熟前后相差较大; 其中, *WI*与顶部新展叶RWC的线性拟合结果表现最好($R^2 = 0.7984$)(图4A)。不同锐齿槲栎叶片的EWT- $DDn_{(1530,525)}$ 在叶片成熟前后的拟合关系相差很小, $DDn_{(1530,525)}$ 与不同发育阶段、不同冠层位置叶片EWT的线性拟合结果表现十分稳定(图4B)。

3 讨论和结论

前人的研究证明, 叶片的水分状况与反射光谱之间存在着紧密的相关关系, 这种关系在近红外区域和短波红外区域的特定波段范围表现得更为显著, 而在可见光区域的相关关系较弱(Carter, 1991; Peñuelas *et al.*, 1993; Foley *et al.*, 2006; Seelig *et al.*, 2008)。叶片在可见光区的反射光谱变化主要受色素的影响(Sims & Gamon, 2002), 在短时间的失水试验中, 色素降解和转化的比例很小, 可见光区的光谱反射率变化也不明显, 故350–750 nm波段的光谱反射率不适于估测叶片水分状况的变化。叶片在近红外区域的光谱反射率主要受叶片内部结构的影响(Jacquemoud & Baret, 1990; Jacquemoud *et al.*, 1996), 水分散失会对叶片的内部结构造成一定影响, 进而会造成750–1300 nm波段光谱反射率的变化。而叶片在短波红外区域的光谱反射率对水分变化最为敏感(Knipling, 1970; Tucker, 1980; Hunt *et al.*, 1987; Carter, 1991; Danson *et al.*, 1992), 尽管某些波段(1730 nm、2100 nm附近)的反射率受叶片干物质的影响较大(Cheng *et al.*, 2011), 但在短时间的失水过程中, 叶片的干物质含量几乎不会发生变化, 水分是引起光谱反射率变化的主因。Inoue等(1993)研究认为短波红外区域的水分吸收波段存在着强烈的大气吸收, 不适合在星载遥感中用于评估植被的水分状

图4 不同发育阶段和冠层位置的锐齿槲栎叶片水分指数-相对含水量(*WI*-RWC)(A)和双差值指数-等效水分厚度($DDn_{(1530,525)}$ -EWT)(B)的线性拟合关系。

Fig. 4 Linear fitting relationship of water index - relative water content (*WI*-RWC)(A) and double difference index - equivalent water thickness ($DDn_{(1530,525)}$ -EWT)(B) of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* leaves in different growth stages and canopy positions.

况,近年来为克服这一缺点,通过航空等手段进行的冠层高光谱遥感逐渐兴起。同一时期植物的冠层光谱受叶片冠层位置的影响较大,而植被不同发育时期的植物冠层光谱也不尽相同,因此,搞清不同发育阶段和不同冠层位置叶片的水分变化及其反射光谱响应的差异对冠层高光谱遥感的应用尤为重要。本研究发现,在锐齿槲栎叶片的失水过程中,*RWC*和*EWT*在不同发育阶段和不同冠层位置上的变异较小(图1),可以稳定地表征树木整体的水分状况。光谱反射率差值分析法和光谱反射率敏感性分析法表明,叶片的光谱敏感性受发育阶段的影响较大(图2);因此,在利用卫星或航空遥感手段监测植被的水分状况时,应选择在植物水分敏感的发育阶段进行。

光谱指数可以放大植被的有效反射信息,减小外部因素影响,构建适宜的敏感光谱指数能够有效地提取植被水分等生化组分信息(Peñuelas *et al.*, 1993; Sun *et al.*, 2008; Cao *et al.*, 2015)。本研究比较和分析了不同光谱指数与不同发育阶段和冠层位置的锐齿槲栎叶片水分指标的定量关系,结果表明,*RWC*和*EWT*比*SWC*和*LMP*具有更好的光谱敏感性,与所选光谱指数具有更好的相关性,适合应用于遥感探测。*WI*、*SRWI*、*NDWI*、*NMDI*和 $DDn_{(1530,525)}$ 与不同叶片样本的*RWC*和*EWT*的相关关系明显优于其他指数,其中,*WI*与*RWC*的相关关系最好; $DDn_{(1530,525)}$ 与*EWT*相关关系的稳定性最好(表3)。从*WI-RWC*的拟合结果可以看出,相同冠层位置叶片的*RWC*与*WI*在叶片成熟前后的拟合关系相差较大;不同冠层位置新展叶的*RWC*与*WI*的拟合关系在叶片成熟前后相差较小,不同冠层位置成熟叶的*RWC*与*WI*的拟合关系在叶片成熟前后相差较大(图4A),即*WI*与*RWC*的线性拟合关系受时间和空间的影响较大。与之相比,不同锐齿槲栎叶片的*EWT*与 $DDn_{(1530,525)}$ 在叶片成熟前后的拟合关系相差很小, $DDn_{(1530,525)}$ 与*EWT*的线性拟合结果表现稳定(图4B)。因此,在所选光谱指数中, $DDn_{(1530,525)}$ 是锐齿槲栎叶片水分变化的最优监测指标。

植物叶片的水分状况与反射光谱之间存在着复杂的相关关系,一方面,植物水分条件的变化会直接引起短波红外区域的光谱反射率发生相应的变化;另一方面,水分的变化又会诱导植物叶片发生生理和叶片结构变化,引起反射光谱中可见光区域

和近红外区域的光谱反射率变化,这可能影响反射光谱对水分变化的敏感性(刘畅等, 2016)。本研究利用快速失水创造水分胁迫条件,锐齿槲栎叶片水分持续减少而其他生化组分含量相对稳定,最大程度地规避了水分之外的因素对反射光谱的影响。研究发现:与*SWC*和*LMP*相比,*RWC*和*EWT*在不同发育阶段和冠层位置之间的变异性更小,能稳定地表征树木整体的水分状况;且*RWC*和*EWT*具有更高的光谱敏感性,适合应用于遥感探测。叶片的光谱敏感性受发育阶段的影响较大;在短波红外区域,成熟叶片在失水胁迫初始阶段的光谱变化较小,而新展叶在整个失水阶段均表现出明显的光谱差异。通过对不同光谱指数与水分指标的相关分析,发现*WI-RWC*和 $DDn_{(1530,525)}-EWT$ 均具有较高的相关性,*WI-RWC*的拟合关系受叶片发育阶段和冠层位置的影响较大;而 $DDn_{(1530,525)}-EWT$ 的拟合关系更为稳定。严重的干旱胁迫会导致叶片气孔导度迅速降低(Souza *et al.*, 2004),叶光合作用速率放缓;如果没有水分供应,植物便会死亡。近年来,干旱在全球范围内导致了森林死亡,而气温的升高会加剧这一事件的发生(Allen *et al.*, 2010)。本研究证明 $DDn_{(1530,525)}$ 可以在叶片尺度反演锐齿槲栎的水分状况,且理论上可以扩大尺度应用于航空和卫星遥感监测,这对锐齿槲栎林的水分监测有一定的参考意义。我们的研究均只在实验室控制条件下对锐齿槲栎进行,试验结果地应用还有待在其他物种上进一步验证。

基金项目 国家自然科学基金(31290223)。

致谢 感谢中国林业科学研究院基本科研业务费专项资金(CAFYBB2017MA009)资助。

参考文献

- Allen CD, Macalady AK, Chenchouni H, Bachelet D, McDowell N, Vennetier M, Kitzberger T, Rigling A, Breshears DD, Hogg EH, Gonzalez P, Fensham R, Zhang Z, Castro J, Demidova N, Lim JH, Allard G, Running SW, Semerci A, Cobb N (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259, 660–684.
- Aoki M, Yabuki K, Totsuka T (1988). Effective spectral characteristics of leaf for the remote sensing of leaf water content. *Journal of Agricultural Meteorology*, 44, 111–117.
- Augusti A, Scartazza A, Navari-Izzo F, Sgherri CLM, Stevanovic B, Brugnoli E (2001). Photosystem II photochemical

doi: 10.17521/cjpe.2016.0095

- efficiency, zeaxanthin and antioxidant contents in the poikilohydric *Ramonda serbica* during dehydration and rehydration. *Photosynthesis Research*, 67, 79–88.
- Cao Z, Wang Q, Zheng C (2015). Best hyperspectral indices for tracing leaf water status as determined from leaf dehydration experiments. *Ecological Indicators*, 54, 96–107.
- Carter GA (1991). Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves. *American Journal of Botany*, 916–924.
- Caturegli L, Grossi N, Saltari M, Gaetani M, Magni S, Nikolopoulou AE, Bonari E, Volterrani M (2015). Spectral reflectance of tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) under different irrigation and nitrogen conditions. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 59–67.
- Ceccato P, Flasse S, Grégoire JM (2002a). Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 2. Validation and applications. *Remote Sensing of Environment*, 82, 198–207.
- Ceccato P, Flasse S, Tarantola S, Jacquemoud S, Grégoire JM (2001). Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment*, 77, 22–33.
- Ceccato P, Gobron N, Flasse S, Pinty B, Tarantola S (2002b). Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1: Theoretical approach. *Remote Sensing of Environment*, 82, 188–197.
- Cheng T, Rivard B, Sanchez-Azofeifa A (2011). Spectroscopic determination of leaf water content using continuous wavelet analysis. *Remote Sensing of Environment*, 115, 659–670.
- Curran PJ (1989). Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sensing of Environment*, 30, 271–278.
- Danson FM, Steven MD, Malthus TJ, Clark JA (1992). High-spectral resolution data for determining leaf water content. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 461–470.
- Du PX, Sun PS, Liu SR, Liu XL (2011). Response of reflectance spectra of *Quercus aquifolioides* leaves to different degrees of water stress. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 15, 210–213. (in Chinese with English abstract) [杜朋选, 孙鹏森, 刘世荣, 刘兴良 (2011). 川滇高山栎幼树叶片反射光谱对不同程度水分胁迫的响应. 现代农业科技, 15, 210–213.]
- Foley S, Rivard B, Sanchez-Azofeifa GA, Calvo J (2006). Foliar spectral properties following leaf clipping and implications for handling techniques. *Remote Sensing of Environment*, 103, 265–275.
- Gao BC (1996). *NDWI*—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257–266.
- Gerhards M, Rock G, Schlerf M, Udelhoven T (2016). Water stress detection in potato plants using leaf temperature, emissivity, and reflectance. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 53, 27–39.
- Graeff S, Claupein W (2007). Identification and discrimination of water stress in wheat leaves (*Triticum aestivum* L.) by means of reflectance measurements. *Irrigation Science*, 26, 61–70.
- Hardisky MA, Klemas V, Smart RM (1983). The influences of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alterniflora* canopies. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 49, 77–83.
- Hunt ER, Rock BN (1989). Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 30, 43–54.
- Hunt ER, Rock BN, Nobel PS (1987). Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 22, 429–435.
- Inoue Y, Morinaga S, Shibayama M (1993). Non-destructive estimation of water status of intact crop leaves based on spectral reflectance measurements. *Japanese Journal of Crop Science*, 62, 462–469.
- Jacquemoud S, Baret F (1990). PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34, 75–91.
- Jacquemoud S, Ustin SL, Verdebout J, Schmuck G, Andreoli G, Hosgood B (1996). Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. *Remote Sensing of Environment*, 56, 194–202.
- Knipling EB (1970). Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1, 155–159.
- Lawlor DW, Cornic G (2002). Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant, Cell & Environment*, 25, 275–294.
- le Maire G, François C, Soudani K, Berveiller D, Pontailler JY, Bréda N, Genet H, Davi H, Dufrêne E (2008). Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of broadleaved forest leaf chlorophyll content, leaf mass per area, leaf area index and leaf canopy biomass. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3846–3864.
- Liu C, Sun PS, Liu SR (2016). A review of plant spectral reflectance response to water physiological changes. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 80–91. (in Chinese with English abstract) [刘畅, 孙鹏森, 刘世荣 (2016). 植物反射光谱对水分生理变化响应的研究进展. 植物生态学报, 40, 80–91.]
- McDowell N, Pockman WT, Allen CD, Breshears DD, Cobb N, Kolb T, Plaut J, Sperry J, West A, Williams DG, Yezzer EA (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*, 178, 719–739.
- McDowell NG, Fisher RA, Xu C, Domec JC, Hölttä T, Mackay DS, Sperry JS, Boutz A, Dickman L, Gehres N, Limousin

- JM, Macalady A, Martinez-Vilalta J, Mencuccini M, Plaut JA, Ogee J, Pangle RE, Rasse DP, Ryan MG, Sevanto S, Waring RH, Williams AP, Yezzer EA, Pockman WT (2013). Evaluating theories of drought-induced vegetation mortality using a multimodel-experiment framework. *New Phytologist*, 200, 304–321.
- Muttiah RS (2002). *From Laboratory Spectroscopy to Remotely Sensed Spectra of Terrestrial Ecosystems*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.
- Osório J, Osório ML, Romano A (2012). Reflectance indices as nondestructive indicators of the physiological status of *Ceratonia siliqua* seedlings under varying moisture and temperature regimes. *Functional Plant Biology*, 39, 588–597.
- Peñuelas J, Filella I, Biel C, Serrano L, Save R (1993). The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1887–1905.
- Peñuelas J, Inoue Y (1999). Reflectance indices indicative of changes in water and pigment contents of peanut and wheat leaves. *Photosynthetica*, 36, 355–360.
- Peñuelas J, Pinol J, Ogaya R, Filella I (1997). Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*, 18, 2869–2875.
- Pu R, Ge S, Kelly NM, Gong P (2003). Spectral absorption features as indicators of water status in coast live oak (*Quercus agrifolia*) leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 1799–1810.
- Seelig HD, Hoehn A, Stodieck LS, Klaus DM, Adams III WW, Emery WJ (2008). The assessment of leaf water content using leaf reflectance ratios in the visible, near-, and short-wave-infrared. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 3701–3713.
- Sevanto S, McDowell NG, Dickman LT, Pangle R, Pockman WT (2014). How do trees die? A test of the hydraulic failure and carbon starvation hypotheses. *Plant, Cell & Environment*, 37, 153–161.
- Shi ZM, Cheng RM, Liu SR (1999). Niche characteristics of plant populations in deciduous broad-leaved forest in Baotianman. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 10, 265–269. (in Chinese with English abstract) [史作民, 程瑞梅, 刘世荣 (1999). 宝天曼落叶阔叶林种群生态位特征. 应用生态学报, 10, 265–269.]
- Sims DA, Gamon JA (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81, 337–354.
- Souza RP, Machado EC, Silva JAB, Lagôa AMMA, Silveira JAG (2004). Photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and some associated metabolic changes in cowpea (*Vigna unguiculata*) during water stress and recovery. *Environmental and Experimental Botany*, 51, 45–56.
- Sun P, Grignetti A, Liu S, Casacchia R, Salvatori R, Pietrini F, Loreto F, Centritto M (2008). Associated changes in physiological parameters and spectral reflectance indices in olive (*Olea europaea* L.) leaves in response to different levels of water stress. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 1725–1743.
- Tian YC, Zhu Y, Cao WX, Dai TB (2004). Relationship between canopy reflectance and plant water status of wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 15, 2072–2076. (in Chinese with English abstract) [田永超, 朱艳, 曹卫星, 戴廷波 (2004). 小麦冠层反射光谱与植株水分状况的关系. 应用生态学报, 15, 2072–2076.]
- Tian YC, Zhu Y, Yao X, Zhou CJ, Cao WX (2006). Quantitative relationships between canopy spectral reflectance and leaf stomatal conductance in rice. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 30, 261–267. (in Chinese with English abstract) [田永超, 朱艳, 姚霞, 周昌俊, 曹卫星 (2006). 水稻叶片气孔导度与冠层反射光谱的定量关系分析. 植物生态学报, 30, 261–267.]
- Tucker CJ (1980). Remote sensing of leaf water content in the near infrared. *Remote Sensing of Environment*, 10, 23–32.
- Wang L, Qu JJ (2007). NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. *Geophysical Research Letters*, 34, L20405. doi: 10.1029/2007GL031021.
- Wang Q, Li P (2012). Hyperspectral indices for estimating leaf biochemical properties in temperate deciduous forests: Comparison of simulated and measured reflectance data sets. *Ecological Indicators*, 14, 56–65.
- Yu GR, Miwa T, Nakayama K, Matsuoka N, Kon H (2000). A proposal for universal formulas for estimating leaf water status of herbaceous and woody plants based on spectral reflectance properties. *Plant and Soil*, 227, 47–58.
- Zarco-Tejada PJ, Rueda CA, Ustin SL (2003). Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. *Remote Sensing of Environment*, 85, 109–124.
- Zhang J, Guo W (2006). Quantitative retrieval of crop water content under different soil moistures levels. *Agriculture and Hydrology Applications of Remote Sensing*, 6411, 64110D. doi: 10.1117/12.697957.
- Zhao S, Wang Q, Yao Y, Du S, Zhang C, Li J, Zhao J (2016). Estimating and validating wheat leaf water content with three MODIS spectral indexes: A case study in Ningxia Plain, China. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 18, 387–398.

责任编辑: 王政权 责任编辑: 李 敏

doi: 10.17521/cjpe.2016.0095

扫码向作者提问