

高光谱遥感监测土壤含水量研究进展

吴代晖, 范闻捷*, 崔要奎, 闫彬彦, 徐希孺

北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871

摘要 土壤含水量是监测旱情墒情的关键参量, 近年来在利用高光谱遥感数据监测土壤含水量方面, 国内外进行了大量的研究。文章首先在分析利用不同波段监测土壤含水量的原理及优缺点基础上, 指出高光谱遥感监测的独特优势和问题。并以此为出发点, 从机理上归纳了土壤含水量对土壤反射率的整体影响, 以及对不同波段响应的差异。在此基础上, 从物理机理和统计方法两个方面, 总结了土壤含水量与土壤反射率的关系。并分析和评价了各模型及统计方法中的关键问题和优缺点。以往研究土壤含水量与土壤反射率关系的实验方法中往往存在一些问题, 文章也一一指出并提出了解决方案。同时, 探讨了高光谱在消除植被影响, 更好地反演土壤含水量方面的可行性。最后对未来的研究方向进行了展望。

关键词 高光谱遥感; 土壤含水量; 反射率

中图分类号: TP79

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)11-3067-05

引言

土壤水分在地表与大气间的物质和能量交换中, 起着极为重要的作用, 是陆地地表参数化的一个关键变量^[1], 同时也是农作物生长发育的基本条件和产量预报模型中的重要参量。土壤含水量是表征土壤水分的关键参数, 是表征一定深度土层干湿程度的物理量。特别是表层土壤含水量是微观气象学和水文学中一个重要的能量平衡参数^[2], 也是旱情监测的重要指标。如何更好的表征遥感反演土壤含水量很值得进一步研究。所以准确地获取土壤含水量信息极为重要。

土壤含水量可以用重量含水量, 体积含水量等方式表示。传统的获取土壤含水量的方法有: 重力法、中子法、伽马射线衰法、张力计等方法。这些传统的方法能准确地获取地面某些点不同深度土层的含水量数据, 但费时费力, 且仅能得到单个点的数据, 代表性差。

遥感具有大面积观测, 高时间分辨率的特点, 可以实时高效的提供大范围的土壤含水量信息。遥感监测土壤含水量可以利用的波段有可见光-近红外、热红外和微波。不同波段反演土壤含水量的原理不同, 具体反演方法也有很大差异。更为值得关注的是, 微波、热红外和可见光监测土壤含水量在物理意义上也存在差异。微波波段可以监测土壤表层几厘

米到几十厘米的土壤含水量。而可见光到热红外波段对土壤穿透深度有限, 只能监测表层几微米的土壤含水量。

微波波段, 具有热红外和可见光-近红外波段无法比拟的全天候全天时优点, 并具有坚实的物理基础, 应用范围较广、精度较高。主动和被动微波都可以用于土壤含水量监测。由于不同含水量的土壤介电特性不同, 其回波信号也不同, 据此主动微波通过后向散射系数来反演土壤含水量^[3]。被动微波利用微波辐射计测得亮度温度, 然后通过物理模型或者与土壤含水量建立经验统计关系, 反演土壤含水量^[4], 但其空间分辨率很低。由于植被本身所含水分对微波信号的吸收和散射, 因此消除植被覆盖的影响是微波遥感监测土壤水分的主要难点^[5]。同时, 土壤的粗糙度也会降低微波信号对土壤含水量的敏感性^[6]。

在热红外波段, 可以利用热惯量法估测土壤含水量^[7]。土壤热惯量是描述土壤热特性的参数, 也是引起土壤表层温度变化的内在因素, 由于水的热容量很大, 所以含水土层的热惯量与土壤含水量密切相关。虽然热惯量法物理意义明确, 但对数据获取有很多限制。如: 要求对同一地区获取白天和黑夜的影像; 对不同地点进行热惯量的比较时, 要求具有相同的热辐射收支。这些要求都很难满足。另外有植被覆盖条件下, 热惯量的表达仍然是一个需要研究的课题。

植被指数-地表温度法, 利用热红外波段和可见光-近红

收稿日期: 2009-12-16, 修订日期: 2010-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(40730525, 40871186), 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB714402)和国家高技术研究发展计划项目(2009AA12Z143-1-1)资助

作者简介: 吴代晖, 1986年生, 北京大学遥感与地理信息系统研究所硕士研究生

*通讯联系人 e-mail: fanwj@pku.edu.cn

外波段,通过监测植被长势和地表辐射温度,间接地反映土壤含水量,是一种基于经验参数化的方法。如:作物缺水指数法^[8]、温度植被干旱指数法^[9]、条件植被指数法^[10]、距平植被指数法^[11]等。这些方法使用简便,便于实践,但经验性太强,监测精度有限。由于影响植被长势的因素有很多,植被生长又对实际的土壤含水量变化存在一定的滞后效应^[12,13],监测效果难以控制。且植被指数-地表温度法,往往需要较长时间序列的影像数据及地面同步气象观测资料做支撑,如:空气温度、辐射等资料。这些条件在大范围实际应用中难以做到。

利用高光谱数据监测土壤含水量,通过直接建立土壤含水量与土壤反射率间的关系实现对土壤含水量的监测。许多地物光谱吸收特征在吸收深度一半处的宽度为 20~40 nm^[14],一般的多光谱传感器不足以用于土壤含水量监测。而高光谱遥感所获得的波段宽度一般在 10 nm 以内,其连续的反射率光谱曲线可以表达地物细微的变化。因此高光谱分辨率可以用于识别土壤含水量对光谱不同波段的吸收特征。但土壤光谱不仅受到土壤含水量的影响,还受土壤有机质含量、矿物成分等因素的影响。所以需要定量描述土壤含水量等参数对反射率的影响。

1 研究进展

国内外学者利用高光谱遥感监测土壤含水量做了大量的研究工作,下面将从土壤含水量对土壤反射率的影响,土壤含水量与土壤反射率关系的定量描述等几个方面进行分析。

1.1 土壤含水量对土壤反射率的影响

早期的对土壤含水量的研究,主要集中于土壤含水量较低的情况,所以认为土壤反射率随着土壤含水量的增加而降低^[15-20]。随着研究的进一步深入和扩展,发现土壤含水量较高时会出现相反的现象。目前普遍认为:对于可见光到短波红外所有波段而言,当土壤含水量低于田间持水量时,土壤反射率随着土壤含水量的增加而降低;而当土壤含水量高于田间持水量时,土壤反射率随着土壤含水量的增加反而增加^[21-24]。这一现象可以解释为:水在土壤中有三种存在形式:结合水、附着水、自由水。当自由水较多,土壤含水量达到或超过田间持水量时,水分形成的薄膜有较强的镜面反射。所以此时,出现土壤反射率随着土壤含水量增加而增加的现象。而当土壤含水量低于田间持水量时,入射光在射入颗粒表面以及从颗粒表面反射出时,附着于土壤颗粒上的水主要起吸收作用。所以当土壤含水量低于田间持水量时,土壤反射率随着土壤含水量的增加而降低。

针对这一现象,Patel 和 Neema 等^[22,23]提出一个新概念“cut-off-thickness”,分离厚度,定义为当只有 5% 的入射光穿透土壤时土壤的厚度。当土壤含水量增加时,分离厚度随之增加;当土壤含水量增加到一定程度时,分离厚度随之减小。Liu 等^[21]的研究认为,反射率变化趋势发生变化的转折点,在土壤含水量为 $0.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的附近。

而对于具体波段而言,不同波段对含水量的响应不同。随着含水量的变化,不同波段变化情况也不一样。当土壤含

水量较低时,随着土壤含水量的增加,短波红外波段反射率变化幅度较大,特别是在 1 450 和 1 940 nm 水分吸收波段。当土壤含水量较高时,随着土壤含水量的增加,可见光-近红外波段反射率变化幅度较大^[21]。但是当考虑大气中水汽吸收的影响时,选择适合遥感监测含水量的波段问题时则更为复杂。

可见光-近红外波段与短波红外哪个波段更适合于土壤含水量的测量,目前研究中存在不同的看法。David^[25]等认为短波红外比可见光-近红外更适合用于土壤含水量监测。他们认为,可见光-近红外波段反射率在土壤含水量接近 20% 时就达到饱和。而短波红外波段在含水量达到 50% 时,仍有较强的响应。并且指出基于指数关系反演土壤含水量时,短波红外的反演参数更加稳定。Etienne 等^[21]则根据他们的研究结果认为,在土壤含水量较低时,短波红外波段更适合用于土壤含水量监测;而当土壤含水量较高时,较短波段更适合。他们的理由是,在土壤含水量较低时,水分吸收对反射率的变化起主要作用,而吸收波段主要在更长波段。当土壤含水量较高时,水分的散射对反射率的变化起主要作用,而这主要是由于更短波段散射引起的。

以往的研究中,土壤含水量对土壤反射率方向性的影响考虑较少。通常针对不同含水量土壤光谱的实验研究,大都设置光源垂直照射土壤,并只测量天顶角下的土壤反射率。这与实际使用时的情形,存在一定差异。随着照射方向、观测方向的变化,不同含水量土壤光谱呈现明显的方向性。我们通过实验测量发现:当光源垂直照射土壤时,土壤反射率随着观测天顶角的增大而变小。土壤的二向反射率在垂直主平面方向是对称的。不同含水量土壤二向性反射特性的研究,有助于更全面地了解土壤含水量对土壤反射率的影响。

1.2 描述土壤含水量与土壤反射率关系的机理模型

在土壤含水量对土壤反射率影响研究的基础上,不同的学者从不同的角度用模型对土壤含水量与土壤反射率的关系进行描述。一些研究从物理机理的角度出发,试图建立土壤反射率与土壤含水量的物理模型。也有些研究从统计学的角度出发,考虑土壤反射率与土壤含水量的统计模型。

1.2.1 描述土壤含水量与土壤反射率关系的物理模型

在早期的研究中,认为土壤含水量与反射率之间存在较好的线性关系^[16,17]。而之后的一些研究表明指数模型能更好的表征土壤反射率与土壤含水量之间的关系^[2,21,24,26,27]。也有研究显示:当所有土壤类型一起考虑时,指数模型反演精度较差,甚至是无效的^[21,25]。

Bach^[22]将不同土壤含水量对反射率变化的影响分成两部分进行考虑。一部分认为是由于覆盖于土壤颗粒上的水膜内部的反射,导致部分能量被反射回土壤颗粒,被土壤颗粒吸收。这一部分用干土壤表面反射率和液态水折射率的函数表示。另一部分认为是由于有效水层的吸收,用比尔定律表示。描述土壤含水量与土壤反射率间关系的模型大都从这两个角度出发。

早在 1925 年,Angstrom^[27]就根据折射定律,提出了描述土壤反射率受湿度影响的一般理论方法。

$$\rho = \frac{\rho_o}{n^2 \times (1 - \rho_o) + \rho_o} \quad (1)$$

式中, ρ 为湿土壤表面反照率, ρ_o 为干土壤表面反射率, n 为液态水折射指数。这一模型后来被逐渐发展和补充^[29, 30]。

Baret 等^[31] 则通过研究同一土壤在同一粗糙度水平下, 不同含水量下的反射率。提出了一个半经验的指数模型。

$$\rho(\lambda) = \rho_{\text{sat}}(\lambda) + (\rho_{\text{sat}}(\lambda) - \rho_{\text{dry}}(\lambda)) \exp^{-a \times \tau} \quad (2)$$

其中, $\rho_{\text{sat}}(\lambda)$ 指当土壤含水量接近饱和时的反射率, $\rho_{\text{dry}}(\lambda)$ 指干土壤反射率, a 代表由于含水量变动而引起的变化系数, τ 为土壤含水量。David^[25] 等利用这一模型反演了不同土壤在不同含水量下的反射率。其研究表明, 基于体积含水量的指数关系明显好于基于重量含水量的指数关系。他同时指出, 在监测土壤含水量时, 利用饱和度替代体积含水量, 有利于减少不同土壤类型带来的差异影响。同时, 在 Baret 的模型基础上, David 发展了一个基于干土壤反射率和体积含水量的简单模型^[25]。

$$\rho(\lambda) = f \times \rho_{\text{dry}}(\lambda) + (1 - f) \times \rho_{\text{sat}}(\lambda) \times e^{-a \times \tau} \quad (3)$$

式中, f 为饱和土壤反射率相对于干土壤的比例。这样减少了一个很不容易得到的参数, 土壤含水量接近饱和时的反射率。提高了模型的实用性和可行性。

也有一部分学者则利用比尔定律解释土壤含水量对土壤反射率的影响^[2], 将模型简化为

$$\rho(\lambda) = \rho_{\text{so}}(\lambda) e^{-a \times \tau} \quad (4)$$

式中, $\rho(\lambda)$ 为湿土壤反射率, $\rho_{\text{so}}(\lambda)$ 为干土壤的反射率。个别参数在不同的研究中定义略有差别, 例如, Bach^[2] 等将 a 定义为水汽吸收系数, 将 τ 定义为水层的有效厚度。邓孺孺^[24] 将 a 定义为: 1% 的土壤含水量, 对某波段入射光在土壤表面的入射和反射过程中所吸收的光强与该波段入射光总强度之比。而 Etienne^[26] 将 a 定义为反射率衰减因子。

这些研究为进一步揭示含水量影响反射率的物理机理, 并最终建立物理模型, 提供了很好的基础。但这些模型都涉及到干土壤反射率。这一信息难以从遥感影像数据中直接获取。同时, 各土壤类型, 由于性质、成分等差异, 干土壤反射率不同。从而影响了模型的大面积推广使用。

土壤反射率受土壤组成、湿度、粗糙度、观测方式等因素综合影响。邓孺孺^[24] 通过分析土壤含水量影响反射率的物理过程, 论证了土壤含水量与土壤光谱服从比尔定律。并根据土壤光谱散射的物理过程建立了一个粗糙土壤表面的二向反射模型。在此基础上建立了粗糙地表土壤含水量遥感模型。

$$\rho(\lambda) = s \rho_{\text{so}}(\lambda) e^{-a \times \tau} \quad (5)$$

$$S = \frac{1}{2\pi} \sum_{j=0}^M \sum_{i=0}^N \frac{k_s k_v p(\alpha) (1 - P_s(\theta_s)) \cos(S, n_s) \cos(V, n_s)}{\cos\theta_s \cos\theta_v \cos\alpha} \Delta\alpha \Delta\phi \quad (6)$$

式中, s 为粗糙度影响因子。 α 和 ϕ 分别为坡度和坡向, 坡面法线单位矢量为 n_s , $p(\alpha)$ 为小平面坡度为 α 的概率。入射方向为 $S(\theta_s, \phi_s)$, 观测方向为 $V(\theta_v, \phi_v)$ 。模型较好地考虑了粗糙土壤的二向反射情况, 但没有给出模型的解析式, 需要通过数值逼近的方法求解, 运算量较大。

Jacquemoud^[28] 通过建立 SOILSPEC 辐射传输模型, 解释了土壤内在光学属性、粗糙度和光源与观测几何角度对土壤二向反射率的影响。模型中的单次散射反照率与粗糙度及测量条件无关, 仅与特定波段的土壤内在光学属性相关。并且指出单次散射反照率随着土壤含水量的增加而降低。但是他没有提出一个模型表征土壤含水量对单次散射反照率的影响。因此这一模型必须要进行改进才能用于土壤含水量的反演。

该模型在推导土壤的内在光学属性时, 可以不必考虑光源与传感器的几何位置。这对于比较不同测量条件下获得的土壤光谱具有重要意义^[28]。并且能够对土壤的光谱反射率进行模拟, 并可以将其作为下垫面在植被冠层反射率模型中直接应用^[29]。在可见光-近红外波段中粗糙度是一个难以表征的参数, 但粗糙度的变化对土壤含水量反演有很大影响。目前很少有这方面的研究, 该模型中涉及到粗糙度参数, 为进行这方面的研究提供了一个很好的契机。

1.2.2 土壤反射率与土壤含水量的统计模型

鉴于定量模型的复杂, 统计方法更为普遍。在建立回归模型前, 必须要考虑波段选择问题。高光谱提供了大量的连续光谱, 而不同的波段之间存在较强的相关性, 数据具有一定的冗余性^[38]。波段选择后, 通过先将反射率转换成相对反射率、反射率倒数、对数、归一化等形式, 接着进行微分、差分等运算, 然后选取相关性最高的波段, 从而建立回归模型, 进而实现对土壤含水量的监测^[33-37]。

但同一方法, 针对不同的光谱数据集, 相关性最好的波段不同。并且, 以往的很多研究主要是基于实验室测量光谱, 仅考虑土壤含水量与土壤反射率的相关性, 忽略了大气影响。以至于他们选择的许多最优波段都处于大气水汽吸收干扰波段 (1 350 ~ 1 450, 1 800 ~ 1 950 和 2 400 ~ 2 500 nm)^[38-40]。这影响其用于影像数据时的实用价值。例如 Liu^[21] 认为的最优波段 1 944 和 1 834 nm, 王静^[31] 认为的最优波段 1 406 nm。同时通过观察发现, 最优波段多数处在水汽吸收波段附近。可见, 进行波段选择时还需要避开大气水汽吸收的干扰波段影响。

这些利用统计方法建立的经验模型, 简单实用, 对特定区域特定土壤有较好的效果。针对不同土壤类型, 均可以通过相关关系得到几个相关系数较好的波段, 并建立回归模型。但不同土壤, 相关系数较好的波段不同, 回归模型系数也不同。该方法应用区域有限, 不适合大范围区域。

1.3 土壤含水量与土壤反射率关系的实验研究方法

土壤含水量与土壤反射率关系的研究, 往往建立在实验室光谱测量的基础上。实验室光谱测量, 可以较好地控制各种影响因素, 从而能够更好的研究反射率与含水量之间的内在关系, 实验成功与否, 是高光谱测量土壤含水量的关键。实验室光谱测量主要涉及以下几个步骤^[21]: (1) 采集土壤, 对土壤进行筛选、研磨等一系列处理, 并自然风干; (2) 将土样装入特定容器中。将容器漆黑以减少对测量光谱的影响, 且容器深度应大于 1.5 cm (因为 1.5 cm 被认为光学厚度无穷的最小深度); (3) 设计不同含水量的土壤样品; (4) 利用室内光源测量光谱后, 通过实时测量重量得到对应的土壤含

水量。

这样的测量方法存在几个问题^[37]。(1)土壤经过处理后,结构发生了很大的变化,甚至破坏;(2)无论用什么样的方法都很难保证土样的含水量均匀,特别是表层土壤含水量与下层土壤含水量一致。那么通过测量整个土样重量变化得到的土壤含水量,和所测量的反射率也无法完全对应;(3)土壤孔隙率及体积密度等物理属性在不同含水量情况下是不同的。当土壤样品含水量达到饱和时,土壤的物理结构被破坏。这些问题都需要在实验中尽量避免。

1.4 基于植被与土壤分离的土壤含水量反演

以上研究均致力于对裸土含水量的遥感监测,但是实际上作物冠层之下的土壤含水量监测对农业和生态研究意义更为重要^[42]。而利用微波和植被指数法进行植被-土壤混合像元监测中都有着不可避免的缺陷。Heike^[40]等利用 Geo-SAIL 模型,模拟了不同含水量土壤作为下垫面时,以及不同植物含水量情况下的冠层反射率,发现植被含水量变化引起的光谱差异不同于土壤含水量变化引起的光谱差异。可见,高光谱遥感能够有希望区分两者带来的影响。刘培君^[41]等通过引入一个“光学植被盖度”的概念,以此来排除植被对土壤水分的干扰,使复合像元亮度变成了裸土光谱亮度,实现植被覆盖区域的土壤含水量监测。

如果能够利用高光谱对混合像元进行光谱分解,通过得到组分和比例信息,将植被和土壤信息分离,有希望能够更好的反演表层土壤含水量。混合像元分解与端元提取是高光谱遥感的主要研究内容。许多遥感物理过程可用线性方程组来描述,可表达为

$$\mathbf{X}_{N \times M} = \mathbf{A}_{N \times J} \mathbf{S}_{J \times M} \quad (7)$$

其中 M 为波段数, N 为混合像元数和 J 组分, $\mathbf{X}_{N \times M}$ 为 N 个混合像元的光谱信息矩阵, $\mathbf{A}_{N \times J}$ 为组分在 N 个混合像元

里的面积比例矩阵, $\mathbf{S}_{J \times M}$ 为 J 个组分信息的光谱信息矩阵。前人对高光谱混合像元分解和端元提取做了大量的研究工作,主要方法有:主成分分析法^[41]、因子分析法^[42]、神经网络法^[43]、盲分解法^[44]等方法。这些研究能够准确提取混合像元中的土壤和植被的端元光谱,并反演得到植被覆盖度。在此基础上,将能很好的去除植被干扰,反演土壤含水量。

2 存在问题和今后研究方向

利用高光谱监测土壤含水量的研究很多,取得了大量成果,但依然有很多问题需要解决。

高光谱对土壤的有效穿透深度有限,仅包含了土壤表层几微米的湿度信息。需要一种表征表面土壤湿度状况的概念^[45],这样才能更好的建立土壤反射率和湿度信息的关系。

在研究土壤含水量与土壤反射率关系时,应该进一步考虑二向性反射等因素对反射率的影响,这是应用高光谱影像数据进行土壤含水量反演的前提。

不同土壤,由于其组成成分存在较大的差异,即使在同一含水量情况下,反射率曲线也存在较大的差异。利用遥感技术进行大面积土壤含水量监测时,往往涉及到不同土壤类型。怎么减少组成成分带来的影响,建立一个适用于多种土壤的反射率与含水量的关系,这是一个不可回避的问题。对同一种土壤而言,土壤含水量及有机质等土壤属性共同影响着反射率,区分好它们对反射率的影响,才能更好的实现各自的定量监测。

高光谱混合像元分解,可以同时得到组分光谱信息和混合比例信息。对监测植被覆盖区域的土壤含水量,具有十分重要的意义。

参 考 文 献

- [1] Blyth E M, Dolman A J, Wood N. The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1993, 119(511): 423.
- [2] Bach M, Mauser W. Proceedings of IGARSS'94, Pasadena, IEEE, 1994, 4: 2354.
- [3] Engman E T, Chauhan N. Remote Sens. Environ., 1995, 51(1): 189.
- [4] Schmugge T J, Gloersen P, Wilheit T. J. Geophys. Res., 1974, 79(2): 317.
- [5] Bindlisha R, Barros A P. Remote Sens. Environ., 2001, 76: 130.
- [6] Baronti S, Del F, Ferrazzoli P et al. International Journal of Remote Sensing, 2001, 16(14): 2639.
- [7] Price J C. Remote Sens. Environ., 1985, 18: 59.
- [8] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J et al. Water Resour Res., 1981, 17: 1133.
- [9] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. Remote Sens. Environ., 2002, 79(2): 213.
- [10] Kogan F N. Int. J. Remote Sens., 1990, 11: 1405.
- [11] CHEN Wei-ying, XIAO Gan-guang, SHENG Yong-wei(陈维英,肖乾广,盛永伟). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 1994, 8(2): 106.
- [12] MAO Xue-sen, ZHANG Yong-qiang, SHEN Yan-jun(毛学森,张永强,沈彦俊). Agricultural Research in the Arid Areas(干旱地区农业研究), 2002, 20(1): 69.
- [13] Jackson R D. Remote Sens. Environ., 1983, 13: 187.
- [14] Hunt G R. Electromagnetic Radiation; the Communication Link in Remote Sensing. in: Remote Sensing in Grolog., 1980.
- [15] Bach H, Verhoef W. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003, IGARSS'03, Proceedings, 2003 IEEE International, 2003: 1679.
- [16] Bowers A S, Smith J S. Soil Sci. Soc. Am. J., 1972, 36: 978.

- [17] Hoffer R M, Johannsen C J. Remote Sensing in Ecology. Athens GA: Univ. of Georgia Press, 1969. 1.
- [18] Ishida T, Ando H, Fukuhara M. Remote Sens Environ. , 1991, 38(3): 173.
- [19] Stoner R E, Baumgardner M F. Soil Sci. Soc. Am. J, 1981, 45: 1161.
- [20] Baumgardner M F, Silva L F, Biehl L L et al. Adv. Agron. , 1985, 38: 1.
- [21] Liu W, Baret F, Gu X, et al. Remote Sens Environ. , 2002, 81(2-3): 238.
- [22] Neema D L, Shah A, Patel A N. Int. J. Remote Sens. , 1987, 8: 1209.
- [23] Patel A N, Neema D L, Shah A. Geotechnical Testing Journal, 1990, 13(2): 115.
- [24] DENG Ru-ru, TIAN Guo-liang, LIU Qin-huo(邓孺孺, 田国良, 柳钦火). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2004, 8(1): 75.
- [25] David B L, Gregory P A. Soil Sci. Soc. Am. J. , 2002, 66(3): 722.
- [26] Etienne M, Henri D. Remote Sens Environ. , 2001, 76(2): 173.
- [27] Angstrom A. Geografiske Annales, 1925, 7: 323.
- [28] Jacquemoud S, Baret F, Hanocq J F. Remote Sens. Environ. , 1992, 41: 123.
- [29] Ni W, Li X. Remote Sens. Environ. , 1999, 74: 113.
- [30] ZHU Yong-hao, DENG Ren-da, LU Ya-fei(朱永豪, 邓仁达, 卢亚非). Acta Pedologica Sinica(土壤学报), 1984, (2): 194.
- [31] WANG Jing, HE Ting, LI Yu-huan(王静, 何挺, 李玉环). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2005, 9(4): 438.
- [32] Liu W, Baret F, Gu X, et al. Int. J. Remote Sens. , 2003, 24(10): 2069.
- [33] WANG Chang-zuo, WANG Ji-hua, WANG Jin-di(王昌佐, 王纪华, 王锦地). Remote Sensing Information(遥感信息), 2003, (4): 33.
- [34] Price J C. Remote Sens. Environ. , 1990, 33: 113.
- [35] Price J C. Remote Sens. Environ. , 1998, 64(3): 316.
- [36] Palacios-Orueta A, Ustin S L. Remote Sens. Environ. , 1996, 57: 108.
- [37] Huan-Jun L, Yuan-Zhi Z, Xin-Le Z, et al. Pedosphere, 2009, 19: 532.
- [38] Hymer D C, Muran M S, Keefer T O. Soil. Sci. Soc. Am. J. , 2000, 64: 319.
- [39] Keike B, Verhoef W. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International 2003, 3: 1679.
- [40] LIU Pei-jun, LIU Lin(刘培君, 刘琳). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 1997, 1(2): 135.
- [41] SHAO Mei-zhen, XU Xi-ru(邵美珍, 徐希孺). Chinese Space Science and Technology (中国空间科学技术), 1989, 5: 63.
- [42] XU Xi-ru, ZHOU Lian-fang, ZHU Xiao-hong(徐希孺, 周莲芳, 朱晓红). Chinese Science Bulletin(科学通报), 1989, 34(12): 946.
- [43] WANG Xi-peng, ZHANG Yang-zhen(王喜鹏, 张养珍). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 1998, 2(1): 51.
- [44] FAN Wen-jie, XU Xi-ru(范闻捷, 徐希孺). Progress in Natural Science(自然科学进展), 2005, 15(8): 993.
- [45] Foody G M. Int. J. Remote Sens. , 1991, 12(7): 1461.

Review of Monitoring Soil Water Content Using Hyperspectral Remote Sensing

WU Dai-hui, FAN Wen-jie*, CUI Yao-kui, YAN Bin-yan, XU Xi-ru

Institute of Remote Sensing and Geographical Information System, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract Soil water content is a key parameter in monitoring drought. In recent years, a lot of work has been done on monitoring soil water content based on hyperspectral remotely sensed data both at home and abroad. In the present review, theories, advantages and disadvantages of the monitoring methods using different bands are introduced first. Then the unique advantages, as well as the problems, of the monitoring method with the aid of hyperspectral remote sensing are analyzed. In addition, the impact of soil water content on soil reflectance spectrum and the difference between values at different wavelengths are summarized. This review lists and summarizes the quantitative relationships between soil water content and soil reflectance obtained through analyzing the physical mechanism as well as through statistical way. The key points, advantages and disadvantages of each model are also analyzed and evaluated. Then, the problems in experimental study are pointed out, and the corresponding solutions are proposed. At the same time, the feasibility of removing vegetation effect is discussed, when monitoring soil water content using hyperspectral remote sensing. Finally, the future research trend is prospected.

Keywords Hyperspectral remote sensing; Soil water content; Reflectance

* Corresponding author

(Received Dec. 16, 2009; accepted Apr. 30, 2010)