

基于地表温度—植被指数三角/梯形特征空间的地表蒸散发遥感反演综述

唐荣林^{1,2}, 王晟力^{1,2}, 姜亚珍^{1,2}, 李召良^{1,2}, 刘萌³, 唐伯惠^{1,2},
吴骅^{1,2}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 农业农村部农业遥感重点实验室, 北京 100081

摘要: 地表蒸散发是地表水分循环和能量平衡的重要组成成分, 其准确估算对农业灌溉与干旱监测、水资源管理、气候变化预估等研究至关重要。基于地表温度—植被指数三角/梯形特征空间开展地表蒸散发遥感反演及土壤蒸发/植被蒸腾分离是地表蒸散发定量遥感研究的国际热点与前沿课题之一。本文全面、系统、深入地综述了地表温度—植被指数三角/梯形空间反演地表蒸散发和分离土壤蒸发与植被蒸腾的国内外研究进展, 详尽阐述了各干湿边确定方法和蒸散发反演建模方法的基本原理、优势与不足等, 明晰了各方法的适用条件并梳理了待进一步解决的问题, 最后指明了三角/梯形特征空间蒸散发遥感反演研究的未来发展方向。通过本文, 有助于深化认识基于三角/梯形特征空间反演地表蒸散发的机理, 为遥感反演地表蒸散发及分离土壤蒸发/植被蒸腾新方法的创立提供启迪, 推动中国蒸散发定量遥感研究水平迈上新台阶。

关键词: 蒸散发, 遥感, 地表温度—植被指数三角/梯形特征空间, 干湿边确定, 蒸发与蒸腾

引用格式: 唐荣林, 王晟力, 姜亚珍, 李召良, 刘萌, 唐伯惠, 吴骅. 2021. 基于地表温度—植被指数三角/梯形特征空间的地表蒸散发遥感反演综述. 遥感学报, 25(1): 65–82

Tang R L, Wang S L, Jiang Y Z, Li Z L, Liu M, Tang B H and Wu H. 2021. A review of retrieval of land surface evapotranspiration based on remotely sensed surface temperature versus vegetation index triangular/trapezoidal characteristic space. National Remote Sensing Bulletin, 25(1): 65–82 [DOI: 10.11834/jrs.20210388]

1 引言

地表蒸散发 (ET) 是地表水分循环和能量平衡的重要组成成分, 其准确估算对农业灌溉与干旱监测、水资源管理、气候变化预估等研究至关重要。从实效性、技术性和经济性等方面来看, 遥感技术以其快速、高时空分辨率、适用于大面积长期观测的特点, 被认为是高时效、高精度获取区域或全球地表蒸散发的最有效手段 (Kalma 等, 2009; Li 等, 2009; Wang 等, 2012; Xu 等, 2013; 高彦春 等, 2008; 周倜 等, 2016; 宋立生 等, 2017)。

基于地表温度—植被指数三角/梯形特征空间开展地表蒸散发遥感反演及土壤蒸发/植被蒸腾分离是地表蒸散发定量遥感研究的国际热点与前沿课题之一 (Moran 等, 1994; Jiang 和 Islam, 1999; Zhang 等, 2005; Wang 等, 2006; Stisen 等, 2008; Tang 等, 2010; Long 和 Singh, 2012; Yang 和 Shang, 2013; Carlson 2013; Tomás 等, 2014; Yang 等, 2015; Minacapilli 等, 2016; Sun 2016; Tang 和 Li, 2017; Zhu 等, 2017a)。通过干湿边 (三角空间或梯形空间的上边界和下边界, 其相对土壤水分分别为 0 或 1) 或极限端元 (干燥裸土、湿润裸土、充分供水植被、无水分可供利用植被) 的确定, 三角/梯形空间根据中间状态像元的位置信息将其

收稿日期: 2020-10-20; 预印本: 2020-12-03

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 41922009, 42071332, 42001306); 国家重点研发计划 (编号: 2018YFA0605400); 中央级科研院所基本科研业务费专项 (编号: 1610132020007)

第一作者简介: 唐荣林, 1983年生, 男, 研究员, 研究方向为地表蒸散发遥感反演、遥感大数据分析。E-mail: tangrl@lreis.ac.cn

通信作者简介: 李召良, 1964年生, 男, 研究员, 研究方向为定量遥感。E-mail: lizl@igsnr.ac.cn

地表蒸散发表达为极限端元地表温度或蒸散发的函数,有效避免了部分植被覆盖情况下地表阻抗难以准确计算的问题,显示出巨大的优势。

然而,虽然国内外同行们基于地表温度—植被指数三角/梯形特征空间,已经发展出了多个蒸散发反演及土壤蒸发/植被蒸腾分离模型(Moran等,1994;Jiang和Islam,1999;Zhang等,2005;Long和Singh,2012;Yang和Shang,2013;Yang等,2015;Sun 2016;Tang和Li,2017),但是由于对相关过程和机理认识不清,对于特征空间内土壤蒸发/植被蒸腾随地表土壤水分以及植被覆盖(覆盖类型及覆盖度)是如何变化的这一科学问题,各模型的解译方案差异较大,导致不同模型之间的反演结果存在显著差异。同时,现有的地表温度—植被指数特征空间干湿边确定方法,或者通过经验回归而受限于遥感观测数据的代表性(Tang等,2010;Tomás等,2014),或者通过理论计算而依赖于大量地面气象与植被数据辅助(Moran等,1994;Zhang等,2015),或者利用长时间序列地表温度极值替代而使其物理意义偏离(Minacapilli等,2016;Zhu等,2017b),导致基于这些方法的地表蒸散发遥感反演精度较低或难以业务化运行。

本文将全面、系统、深入地综述地表温度—植被指数三角/梯形特征空间反演地表蒸散发或分离土壤蒸发与植被蒸腾的国内外研究进展,详尽阐述基于特征空间各干湿边确定方法和蒸散发反演建模方法的基本原理,明晰各方法的适用条件、优势与不足等,并梳理待进一步解决的问题,最后指出三角/梯形特征空间蒸散发遥感反演研究的未来发展方向。通过本文,有助于深化认识基于三角/梯形特征空间反演地表蒸散发的机理,为遥感反演地表蒸散发及土壤蒸发/植被蒸腾分离新方法的创立提供启迪,为蒸散发估算精度的提升提供思路和借鉴,推动中国蒸散发定量遥感研究水平迈上新台阶。

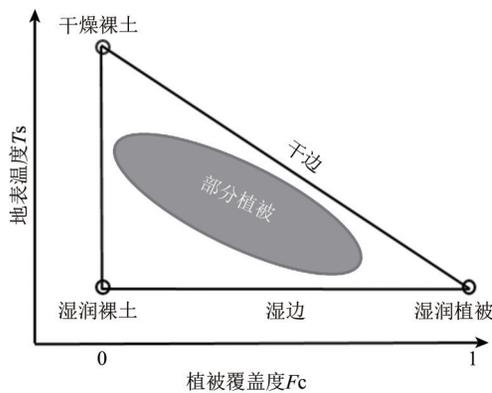
2 代表性地表温度—植被指数三角/梯形特征空间法

经过约40年的发展,地表蒸散发的遥感反演方法主要可分为地表温度—植被指数三角/梯形特征空间法(Moran等,1994;Jiang和Islam,1999;Wang等,2006;Carlson,2007;Stisen等,2008;Tang等,2010;Long和Singh,2012;Yang和Shang,

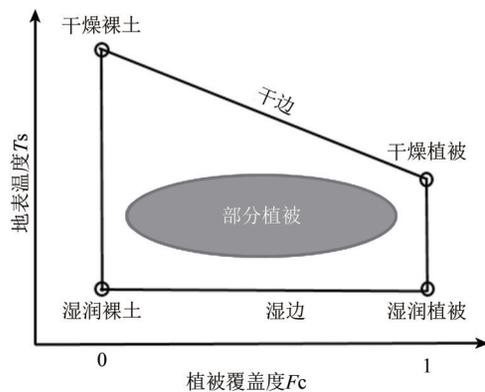
2013;Merlin等,2014;Yang等,2015;Sun 2016;Minacapilli等,2016;Tang和Li,2017;Carlson和Petropoulos,2019)、一源和二源地表能量平衡模型法(Norman等,1995;Anderson等,1997;Bastiaanssen等,1998;Su 2002;Jia等,2003;Allen等,2007;Kustas和Anderson,2009;Chen等,2013;Lu等,2013;Qiu等,2015;Xiong等,2015;Song等,2016,2018;Bhattarai等,2017;Ma等,2018;Gan等,2019)、Penman-Monteith方程或Priestley-Taylor方程估算法(Fisher等,2008;Yuan等,2010;Mu等,2011;Hu等,2015;Yao等,2015;Liu等,2016;Wu等,2016;Khan等,2018;Wang等,2019;Zhang等,2019)、数据同化法(Oliso等,1999;Xu等,2019)、非参数化法(Liu等,2012;Pan等,2017)、经验回归法/机器学习法(Wang等,2007;Xu等,2018;Jung等,2019;Carter和Liang,2019)等。相关代表性综述论文可见Kalma等(2009)、Li等(2009)、Wang和Dickinson(2012)、Zhang等(2016)和Chen和Liu(2020)等。下面主要综述基于地表温度—植被指数三角/梯形特征空间(图1)开展地表蒸散发遥感反演的国内外进展。

地表温度—植被指数三角/梯形特征空间的雏形最早可追溯于Goward等(1985)提出的地表温度—植被指数负相关关系。该相关关系随后被广泛应用于土壤湿度、地表阻抗、土地利用/覆盖变化、干旱以及地表蒸散发估算等方面的研究(Price,1990;Lambin和Ehrlich,1996;Gillies等,1997;Goward等,2002;Sandholt等,2002;Carlson 2007,2013;Petropoulos等,2009;Jiang等,2009;Sun等,2012;Peng等,2013;Zhao和Liu,2014;Garcia等,2014;Zhao等,2017;Tagesson等,2018;Liu等,2018;Shekar和Nandagiri,2020)。在大气强迫相似条件下,当研究区内植被根区充分供水而表层相对土壤水分和植被覆盖度均在0—1范围变化、且去除云和地形效应对地表温度的影响时,地表温度—植被指数二维散点图将呈近似三角形空间分布;而当根区相对土壤水分也在0—1范围变化时,三角空间将进一步演变为梯形空间(Jiang和Islam,2003;Carlson 2013;Tang等,2015)。三角空间和梯形空间的形状由位于上边界的干边(相对土壤水分为0)和位于下边界的湿边(相对土壤水分为1)共同控制,且这两个空间具有相同的干燥裸土、湿润裸土和充分供

水的湿润植被端元（即具有相同物理意义的湿边），而梯形空间比三角空间多了一个无水分可利用的干燥植被端元（图1）。基于地表温度—植被指数三角/梯形特征空间反演地表蒸散发的关键在于（1）如何确定干湿边或极限端元的地表温度；（2）如何开展地表蒸散发反演或土壤蒸发/植被蒸腾分离的建模。需要说明的是，在地表温度—植被指数三角/梯形特征空间法中，一些研究尝试利用近地面温差、日夜地表温度之差、晴空上午两时刻地表温度之差等来代替地表温度，或者利用植被覆盖度（ F_c ）、土壤调节植被指数（SAVI）等代替常用的归一化植被指数（NDVI）。由于这些研究中的干湿边或极限端元确定方法以及地表蒸散发建模方法均大同小异，故本文中对此类方法统称为地表温度—植被指数三角/梯形特征空间法。



(a) 三角形空间
(a) Triangular space



(b) 梯形空间
(b) Trapezoidal space

图1 地表温度—植被指数(以植被覆盖度为例)三角/梯形特征空间概念图

Fig. 1 Conceptual diagram of the surface temperature versus vegetation index (take vegetation coverage as an example) triangular/trapezoidal characteristic space

2.1 三角/梯形特征空间干湿边或极限端元温度的确定

地表温度—植被指数三角空间的干边具有表层相对土壤水分为0、地表蒸散发随着植被指数的增加由0到潜在蒸腾之间变化的特征（Jiang和Islam, 1999; Sandholt等, 2002; Stisen等, 2008; Carlson 2007, 2013），而梯形空间的干边具有表层与根区相对土壤水分均为0且地表蒸散发也为0的特征（Moran等, 1994; Long和Singh, 2012; Yang和Shang, 2013; Yang等, 2015; Sun, 2016; Tang和Li, 2017）。三角/梯形特征空间干湿边或极限端元温度的确定方法（表1）主要包括：（1）经验回归法；（2）理论计算法；（3）时间序列法。

2.1.1 经验回归法

经验回归法（Tang等, 2010; Tomás等, 2014; Zhang等, 2016; Wang等, 2017; Hu等, 2019; Zare等, 2020）充分利用一定空间范围内的遥感地表温度和植被指数的二维散点图，依据干边和湿边的基本物理特征，无需任何近地面辅助数据，通过地表温度与植被指数的回归关系（多数研究为线性），即可实现干边和湿边的确定，在处理大批量数据方面具有显著优势，便于业务化运行。

$$T_{\text{dry}} = a_{\text{dry}} + b_{\text{dry}}VI \quad (1)$$

$$T_{\text{wet}} = a_{\text{wet}} + b_{\text{wet}}VI \quad (2)$$

式中， T 为三角或梯形空间干边或湿边地表温度， VI 为植被指数， a 和 b 为经验回归系数。下标dry和wet分别代表干边和湿边。

然而，当特征空间内靠近干边（湿边）附近位置的像元无法全部达到相对土壤水分均为0（1）这一要求时，简单的经验回归法常常会受到伪干（湿）点的影响，造成干（湿）边确定具有较大的不确定性。

为消除伪干点和伪湿点对干湿边确定的影响，解决干湿边确定具有较大不确定性的问题，Tang等（2010）和唐荣林（2011）在解译观测干湿边与理论干湿边差异的基础上，提出干边温度“存高去低”的筛选思路，然后通过阈值（由遥感地表温度反演的不确定性和统计学中的异常值确定）设定和迭代计算剔除伪干点，并假定全植被覆盖时的干边温度与湿边温度相等，进一步基于线性拟合技术提出了鲁棒的地表温度—植被指数（ T_s - VI ）特征空间“干湿边自动确定法”（图2）。

“干湿边自动确定法”基本消除了“伪”干点和“伪”湿点的影响，不仅解决了干湿边确定具有较大主观性和不确定性的问题，显著提高了瞬时蒸散发的反演精度，而且提高了 T_s-VI 特征空间的实用性和业务化运行能力，使其更有效地应用于地表蒸散发和土壤表层水分遥感反演、区域干旱遥感监测等方面。通过对西班牙中部 Henares River 流域的地表蒸散发进行遥感反演，Tomás 等 (2014) 发现，与传统的简单经验回归法来确定干湿边相比，“干湿边自动确定法”可使蒸散发反演误差降低约 40%。值得注意的是，虽然经验回归法具有简单、易用、可操作性强等优势，并且在基

于地表温度—植被指数特征空间开展地表蒸散发、土壤水分、干旱监测等方面获得了广泛应用，但由于其受限于遥感观测数据本身，通过该方法所估算的结果具有明显的空间尺度效应 (Long 等, 2012; Tian 等, 2013; Tang 和 Li, 2015)，导致针对不同大小尺寸的研究区和不同高低分辨率的遥感数据所估算的结果均不一致。同时，由于经验回归法完全依赖于研究区内的遥感观测数据，当研究区内不存在相对土壤水分为 0 或 1 的像元点时，利用该方法将只能得到所谓的观测干边和湿边，而无法得到具有物理意义的真实干边和湿边，并进而影响地表蒸散发的遥感反演精度。

表 1 代表性地表温度—植被指数三角/梯形空间干湿边/点确定法

Table 1 Representative methods of dry and wet edge/end-member determination in land surface temperature-vegetation index triangle/trapezoid space

方法	原理	优点	不足	参考文献
简单回归法 经验回归法	最小二乘法	简单、实用; 只需遥感数据	干湿边取决于空间散点图信息的代表性; 易受异常点影响、不确定性大、受遥感数据空间尺度效应影响大	Tomás 等(2014)
干湿边自动确定法	最小二乘法	简单、实用; 对异常点的影响不敏感; 只需遥感数据	干湿边取决于空间散点图信息的代表性、受遥感数据空间尺度效应影响大	Tang 等(2010)
理论计算法	能量平衡原理	无需空间散点图信息; 可得到真实干湿点、几乎不受空间尺度效应影响	需近地面数据辅助	Moran 等(1994)
时间序列法	最大值法、最小值法	无需空间散点图信息; 只需遥感数据	偏离了干湿点应有的物理含义(对应最高和最低的土壤水分)、受空间尺度效应影响	Minacapilli 等(2016)

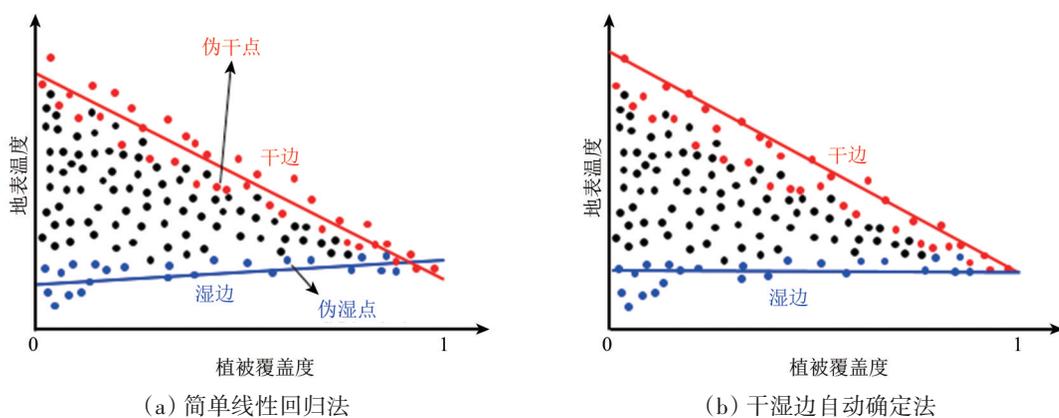


图 2 地表温度—植被指数三角空间干湿边经验回归确定方法效果图

Fig. 2 The diagram of two regression methods for determining the dry and wet edges of the land surface temperature-vegetation index triangular space

2.1.2 理论计算法

为解决经验回归法所存在的不足，研究者们

相继提出了一系列基于 Penman-Monteith 方程或地表能量平衡原理来确定特征空间干湿边或极端端

元温度的理论计算法 (Moran 等, 1994; Nishida 等, 2003; Zhang 等, 2005; Long 和 Singh, 2012; Sun 等, 2012; Yang 和 Shang, 2013; Zhang 等, 2015; Sun 2016; Sun 等, 2017; Zhu 等, 2017a; Hu 等, 2019)。例如, 针对极限端元各自不同的阻抗特征, Moran 等 (1994)、Yang 等 (2015) 和 Tang 和 Li (2017) 借助地面观测气象和植被数据等, 在利用地表总净辐射或将其分解成土壤和植被组分净辐射的基础上, 结合 Penman-Monteith 方程, 估算得到了梯形空间内干燥裸土、湿润裸土、充分供水植被和无水分可供利用植被等 4 个极限端元的温度。Nishida 等 (2003)、Zhang 等 (2005)、Long 和 Singh (2012) 和 Sun 等 (2017) 从地表能量平衡的角度, 借助于地面观测气象数据, 假定干燥裸土 (或无水分可供利用植被) 的蒸散发为 0, 实现了三角或梯形空间内干燥裸土 (或无水分可供利用植被) 温度的确定。此外, Zhang 等 (2005) 和 Sun 等 (2017) 还从地表能量平衡的角度, 估算得到了湿润裸土和水分充分供给植被的温度。以 Moran 等 (1994) 的工作为例, 梯形空间的 4 个极限端元可通过结合 Penman-Monteith 方程与地表能量平衡方程求得:

$$T_{sd} = (r_a(R_n - G)/C_v) + T_a \quad (3)$$

$$T_{sw} = (r_a(R_n - G)/C_v)(\gamma(\Delta + \gamma)) - \text{VPD}/(\Delta + \gamma) + T_a \quad (4)$$

$$T_{vd} = (r_a(R_n - G)/C_v)(\gamma(1 + r_{cx}/r_a)/(\Delta + \gamma(1 + r_{cx}/r_a))) - \text{VPD}/(\Delta + \gamma(1 + r_{cx}/r_a)) + T_a \quad (5)$$

$$T_{vw} = (r_a(R_n - G)/C_v)(\gamma(1 + r_{cp}/r_a)/(\Delta + \gamma(1 + r_{cp}/r_a))) - \text{VPD}/(\Delta + \gamma(1 + r_{cp}/r_a)) + T_a \quad (6)$$

式中, T_{sd} 为干燥裸土端元所对应的地表温度 (地表阻抗趋近于无穷大); T_{sw} 为湿润裸土端元所对应的地表温度 (地表阻抗为 0); T_{vd} 为无水分可供利用的植被 (本文亦称作干燥植被) 端元所对应的地表温度; T_{vw} 为充分供水条件下的植被 (本文亦称作湿润植被) 端元所对应的地表温度; r_a 为空气动力学阻抗; R_n 为地表净辐射; G 为土壤热通量; C_v 为空气体积热容; γ 为湿度计常数; Δ 为饱和水汽压—气温曲线的斜率; VPD 为饱和水汽压与实际水汽压之差; r_{cx} 为气孔完全闭合情况下的冠层最

大阻抗; r_{cp} 为最小冠层阻抗; T_a 为气温。值得注意的是, Long 和 Singh (2012)、Yang 和 Shang (2013) 和 Sun 等 (2017) 等在研究无水分可供利用植被温度的计算过程中均假定植被高度为固定值 (1 m), 当植被真实高度 (如作物生长初期) 与此固定值差异较大时, 可能会造成该极限端元温度的估算存在较大偏差, 进而影响地表蒸散发的估算。Sun 等 (2017) 在对比不同的干湿边/极限端元温度确定方法后发现: 对于干燥裸土, 基于 Penman-Monteith 方程与基于地表能量平衡原理可以估算得到相同的温度, 而对于无水分可供利用植被, 前者方法所估算得到的温度要低于后者方法; 基于地表能量平衡原理并结合 Priestley-Taylor 方程所估算得到的湿润裸土和充分供水植被温度均高于气温, 而基于 Penman-Monteith 方程可以获得最高的湿润裸土温度和最低的充分供水植被温度。可以看出, 与经验回归法完全依赖于研究区内遥感观测数据的代表性不同, 理论计算法能够计算得到具有物理意义的真实干湿边或极限端元温度。该类方法的不足之处主要在于其需要近地面气象和植被数据的辅助。

2.1.3 时间序列法

为解决经验回归法和理论计算法所存在的不足, 一些研究者新近提出了利用长时间序列遥感数据来确定特征空间极限端元温度的方法 (Minacapilli 等, 2016; Zhu 等, 2017a; Babaeian 等, 2018; Mohseni 和 Mokhtarzade, 2020)。例如, Minacapilli 等 (2016) 利用每个像元长时间序列的 8 天 MODIS 日夜地表温度温差, 分析确定该像元温差的极大值和极小值, 分别作为该像元对应的极干点温度和极湿点温度。在此基础上, 他们进一步提出基于逐像元的时域三角空间法, 并结合 Priestley-Taylor 方程, 开展地表水分亏缺条件下的 ϕ 因子和地表蒸散发的遥感估算。Zhu 等 (2017a) 针对研究内区的每一个像元, 将由地表能量平衡原理估算的干燥裸土瞬时地表温度的长时间序列平均值作为该像元最终的干燥裸土地表温度, 并利用他们提出的修正的温度—植被干旱指数 (MTVDI), 结合土壤的田间持水量和凋萎含水量信息, 实现像元体积含水量的遥感反演。以 Minacapilli 等 (2016) 的工作为例, 三角空间的干燥裸土端元温度和湿润裸土端元温度 (与湿边温度相等) 通过下式确定:

$$T_{sd} = \max(T_{R,d} - T_{R,n}) \quad (7)$$

$$T_{sw} = \min(T_{R,d} - T_{R,n}) \quad (8)$$

式中, $T_{R,d}$ 和 $T_{R,n}$ 分别为同一日白天和夜间卫星过境时刻的遥感地表温度。

需要注意的是, 在Minacapilli等(2016)提出的极限端元确定方法中, 当极干点和极湿点温度确定以后, 相同的MODIS日夜温差值会计算得到相同的水分亏缺结果, 但事实上造成相同温差的原因有可能是不同时期气象强迫的差异, 而非相同的土壤水分亏缺状况。类似地, 当干燥裸土瞬时地表温度低(高)于长时间序列平均值时, Zhu等(2017a)的长时间序列平均值法会高(低)估地表蒸散发和土壤水分。总的来说, 基于长时间序列遥感数据的方法给极限端元温度的确定提供了非常好的思路, 并在三角/梯形特征空间地表蒸散发和土壤水分反演方面取得了一定成功, 但通过现有方法确定的极限端元温度已经偏离了其原有的物理含义(某给定大气强迫条件下对应的干燥裸土温度), 且可能会存在较大偏差, 从而给反演结果带来较大不确定性。

值得一提的是, 针对三角/梯形特征空间湿边温度的确定, 很多研究尝试对其简化处理——利用研究区内平均气温(Long和Singh, 2012; Yang和Shang, 2013)、最低地表温度(Sandholt等, 2002; Tomás等, 2014)、全植被覆盖地表的气温(Zhang等, 2008; Jiang等, 2009)、水体表面温度(Sun等, 2012; Zhu等, 2017a, 2017b)等来代替

湿边温度。

2.2 地表蒸散发反演及土壤蒸发/植被蒸腾分离建模

应用地表温度—植被指数三角/梯形特征空间的假设条件是: 在一定的大气强迫条件下, 对于某给定植被指数, 地表温度的高低是由地表水分的亏缺程度决定的; 而对于某给定地表水分亏缺状况, 地表温度的变化则由地表不同的植被覆盖度控制。在此假设条件下, 通过解译地表蒸散发在三角/梯形特征空间内随地表温度及植被指数的变化规律, 利用干湿边或极限端元的温度及蒸散发, 结合目标像元在特征空间内的位置信息, 开展目标像元地表蒸散发反演及土壤蒸发/植被蒸腾分离的建模, 实现水分亏缺及部分植被覆盖像元的地表蒸散发估算。其中, 地表温度—植被指数三角空间主要被用来开展混合像元地表蒸散发的遥感反演建模, 而梯形空间则既被用来开展混合像元地表蒸散发的反演建模, 也被用来开展混合像元内土壤蒸发/植被蒸腾分离的建模。

基于地表温度—植被指数三角/梯形空间开展地表蒸散发反演建模的方法(表2)主要包括“三角空间法”(Jiang和Islam, 1999)和“梯形空间法”(Moran等, 1994, 1996), 而开展土壤蒸发/植被蒸腾分离建模的方法主要包括“同步分离法”(Zhang等, 2005, 2008; Long和Singh, 2012; Yang和Shang, 2013; Yang等, 2015)和“两段分离法”(Tang等, 2015; Sun, 2016; Tang和Li, 2017)。

表2 地表温度—植被指数三角/梯形空间蒸散发遥感反演模型比较

Table 2 Comparison of models of evapotranspiration retrieval based on remotely sensed land surface temperature-vegetation index triangular/trapezoidal characteristic space

类别	方法	算法	优点	不足	是否分离土壤蒸发与植被蒸腾	参考文献
三角空间	PT- ϕ 系数再参数化法	Priestley-Taylor方程	可全遥感反演、无需阻抗计算	干湿边确定常常具有较大不确定性	否	Jiang和Islam(1999)
	水分亏缺指数法		避免了部分植被覆盖情况下阻抗计算的困难	需近地面数据辅助	否	Moran等(1994)
梯形空间	同步分离法	Penman-Monteith方程或Priestley-Taylor方程	实现了基于梯形空间的土壤蒸发与植被蒸腾分离	未考虑根区与表层土壤水分变化的差异、需近地面数据辅助	是	Zhang等(2005, 2008)
	两段分离法		实现了基于梯形空间的土壤蒸发与植被蒸腾分离、考虑了根区与表层土壤水分变化的差异	需近地面数据辅助	是	Tang等(2015) Tang和Li(2017)

2.2.1 三角空间法

Jiang和Islam(1999)首次结合地表温度—归

一化植被指数三角空间将应用于湿润地表 Priestley-Taylor方程中的 ϕ 系数(一般设为1.26)

重新参数化，即通过预先设定的干湿边或极限端元处的 ϕ 值利用线性插值技术获取给定像元的 ϕ 值（在0—1.26之间变化），提出了著名的地表蒸散发遥感反演“三角空间法”（图3，表2），实现了水分亏缺地表的蒸散发全遥感估算。

$$LE = \phi_i \left(R_n - G \right) \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \quad (9)$$

$$\phi_i = \frac{T_{\max,i} - T_{s,i}}{T_{\max,i} - T_{\min,i}} (\phi_{\max,i} - \phi_{\min,i}) + \phi_{\min,i} \quad (10)$$

式中， LE 为潜热通量； ϕ_i 为水分亏缺状况下某一位置像元 i 的Priestly-Taylor方程系数； $T_{s,i}$ 为像元 i 的地表温度； $T_{\max,i}$ 和 $T_{\min,i}$ 分别为三角空间干边和湿边上与像元 i 具有相同植被指数的地表温度；

$\phi_{\max,i}$ 和 $\phi_{\min,i}$ 分别为三角空间干边和湿边上与像元 i 具有相同植被指数的 ϕ 值。 $\phi_{\max,i}$ 一般认为在湿边上保持不变，通常设定为1.26或 $(\Delta + \gamma)/\Delta$ 。 $\phi_{\max,i}$ 在干边上由干燥裸土处的 $\phi_{\min}=0$ 到全植被覆盖处的 ϕ_{\max} 之间随植被指数线性变化，即 $\phi_{\min,i} = \phi_{\max,i} \cdot F_c$ 。与常规的地表能量平衡模型不同，“三角空间法”由于结构简单、无需估算地表阻抗、无需地表温度反演时的精确大气校正、可直接估算蒸发比且仅依靠遥感数据作为输入等优势（表2），在蒸散发的遥感反演方面具有显著优势，并在全球不同地区获得了广泛应用（Wang等，2006；Stisen等，2008；Tang等，2010；Tomás等，2014；Zhu等，2017a）。

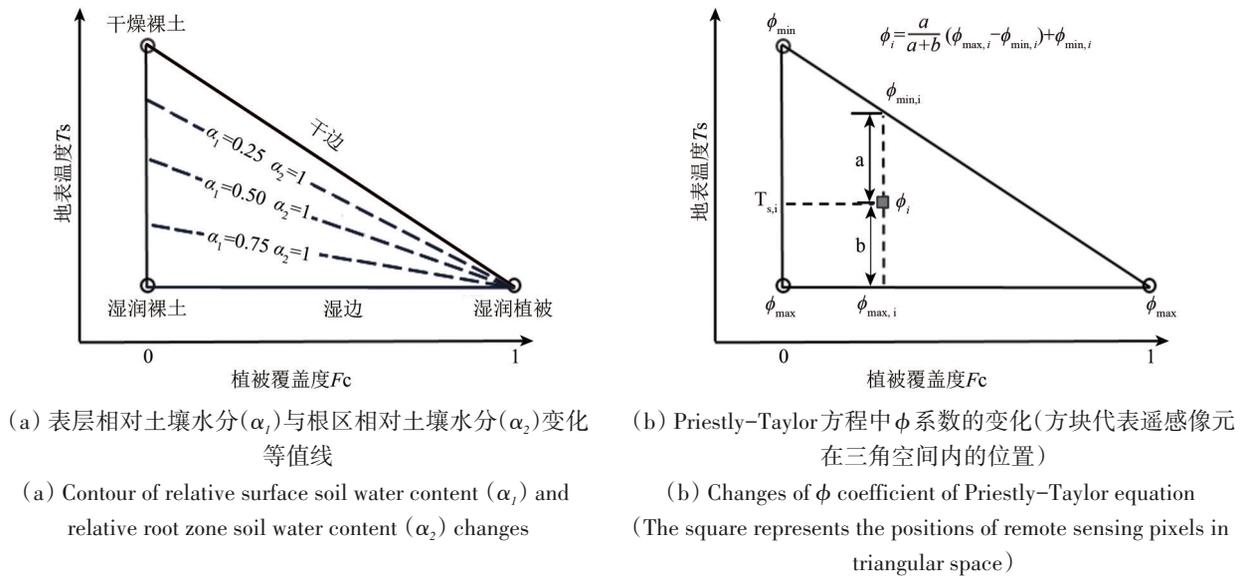


图3 地表温度—植被指数三角空间的相对土壤水分与Priestly-Taylor方程中 ϕ 系数的变化示意图

Fig.3 Illustration of changes of relative soil water content and ϕ coefficient of Priestly-Taylor equation in the surface temperature-vegetation index triangular space

随后，在“三角空间法”整体建模方案不变的基础上，一些研究对其中的部分参数化方案稍作了调整。例如，Stisen等（2008）和Tang等（2010）认为干边上的 ϕ 值应该随着植被覆盖度而非归一化植被指数线性变化，Zhu等（2017a）结合温度—植被干旱指数来参数化 ϕ 参数。唐荣林（2011）、Tang等（2015）和Sun（2016）通过土壤—植被—大气水分与能量传输模型的模拟，证实了“三角空间”建模方案的合理性。值得注意的是，“三角空间法”只反映了表层土壤水分的亏缺，所估算的给定植被指数条件下不同像元的蒸散发变化也是由于土壤蒸发的差异造成的，而植被根区

则一直是充分供水且处于潜在蒸腾状态的（Jiang和Islam，2003；Carlson2013；Carlson和Petropoulos，2019；Chen和Liu，2020）。因此，在三角空间内，只有干燥裸土的蒸散发为0，干边上的蒸散发则随植被指数的增加由0到潜在蒸散发之间变化。此外，当研究区内存在粗糙度显著不同的植被时，“三角空间法”由于未有效考虑不同植被类型覆盖所具有的地表空气动力学阻抗的差异，但却采用相同的干湿边或极限端元温度，使得相同温度的不同植被类型覆盖的地表具有相同的蒸发比，可能会对蒸散发的反演精度造成一定的影响（Tang和Li，2015）。

2.2.2 梯形空间法

2.2.2.1 水分亏缺指数法

通过假定作物水分亏缺指数 WDI (Water Deficit Index, 定义为实际蒸散发与潜在蒸散发的比值) 在梯形空间湿边和干边之间随着地表温度的升高而从 0 到 1 之间线性变化, Moran 等 (1994, 1996) 结合基于 Penman-Monteith 方程的潜在蒸散发 (LE_p) 计算以及梯形空间四个极限端元 (干燥裸土、湿润裸土、干燥植被、湿润植被) 温度的计算, 提出了水分亏缺状况下区域地表蒸散发遥感估算的地表温度—植被指数梯形空间“水分亏缺指数法” (表 2)。

$$LE = LE_p(1 - WDI) \quad (11)$$

$$WDI = \frac{(T_s - T_{a,w}) - (T_s - T_{a,r})}{(T_s - T_{a,w}) - (T_s - T_{a,d})} \quad (12)$$

式中, 下标 w、d 和 r 分别为某一植被指数条件下的最小、最大和观测地气温差 $T_s - T_a$ 。

与地表温度—植被指数三角空间相比, “水分亏缺指数法” 梯形空间的应用无需大量具有广泛土壤水分或植被指数变化的像元存在。然而, 由于需要较多的近地面辅助数据开展极限端元温度的计算, 梯形空间的应用受到了较大程度的限制, 特别是在资料缺乏或无资料地区。另外, 该方法只能估算得到总蒸散发, 而无法分离土壤蒸发与植被蒸腾。

2.2.2.2 同步分离法

为实现土壤蒸发与植被蒸腾的遥感分解, 在梯形空间概念的基础上, Zhang 等 (2005)、Long 和 Singh (2012)、Yang 和 Shang (2013) 和 Yang 等 (2015) 假定表层土壤水分和根区土壤水分在梯形空间干边和湿边之间由低到高同步变化 (即具有相同的土壤水分含量等值线, 图 4), 然后利用四个极限端元温度开展处于中间状态像元的土壤与植被组分温度分解以及土壤蒸发与植被蒸腾分离的建模, 提出了各自不同的土壤蒸发/植被蒸腾“同步分离法”模型 (表 3)。

对于一个典型的“同步分离法”模型, 当梯形空间的四个极限端元温度确定后, 假定干边上的温度是线性变化的, 可由干燥裸土端元温度与干燥植被端元温度, 结合植被覆盖度 (F_c), 求得某一植被指数条件下对应的最大地表温度 (即干边温度)。

$$T_{dry} = (T_{vd} - T_{sd})F_c + T_{sd} \quad (13)$$

类似地, 假定湿边上的温度是线性变化的, 可由湿润裸土端元温度与湿润植被端元温度, 结合植被覆盖度, 求得某一植被指数条件下对应的最小地表温度 (即湿边温度)。

$$T_{wet} = (T_{vw} - T_{sw})F_c + T_{sw} \quad (14)$$

对于某一感兴趣混合像元 (F_c, T_s), 假定地表温度 ($T_s \in [T_{wet}, T_{dry}]$)、土壤组分温度 ($T_{soil} \in [T_{sw}, T_{sd}]$) 和植被组分温度 ($T_{veg} \in [T_{vw}, T_{vd}]$) 三者干边温度和湿边温度之间线性变化速率一致 (图 4), 可求得土壤组分温度和植被组分温度。

$$T_{soil} = T_{sw} + \frac{T_s - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}}(T_{sd} - T_{sw}) \quad (15)$$

$$T_{veg} = T_{vw} + \frac{T_s - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}}(T_{vd} - T_{vw}) \quad (16)$$

相应地, 假定土壤蒸发在干燥裸土端元蒸发 ($LE_{sd} = 0$) 与湿润裸土端元蒸发 (LE_{sw}) 之间随土壤温度线性变化、植被蒸腾在干燥植被端元蒸腾 ($LE_{vd} = 0$) 与湿润植被端元蒸腾 (LE_{vw}) 之间随植被温度线性变化, 可求得像元的土壤蒸发 (LE_{soil}) 与植被蒸腾 (LE_{veg})。

$$LE_{soil} = \frac{T_{sd} - T_{soil}}{T_{sd} - T_{sw}}LE_{sw} \quad (17)$$

$$LE_{veg} = \frac{T_{vd} - T_{veg}}{T_{vd} - T_{vw}}LE_{vw} \quad (18)$$

式中, 极限端元温度、湿润裸土端元蒸发与湿润植被端元蒸腾的确定以及其他变量的确定, 不同的“同步分离法”模型稍有不同, 详情可参见 (Zhang 等, 2005)、Long 和 Singh (2012)、Yang 和 Shang (2013) 和 Yang 等 (2015)。

值得注意的是, “同步分离法”针对梯形空间的土壤水分解译以及地表蒸散发反演建模方案, 会使由梯形空间与由三角空间所分别估算的地表蒸散发在物理意义以及结果精度方面存在差异, 即使梯形空间与三角空间不相互兼容。

2.2.2.3 两段分离法

Jiang 和 Islam (2003) 首次解译了三角空间和梯形空间的形成机制, 认为梯形空间是由于植被根区缺水从三角空间进一步演化而来的。Tang 等 (2015) 和 Tang 和 Li (2017) 通过土壤—植被—大气水热传输模型的模拟以及理论分析, 提出了土壤水分近似“上亏下盈、下亏上无” (即当表层土壤水分亏缺造成土壤蒸发低于潜在蒸发时, 根区土壤供水充分且植被是处于潜在蒸腾状态的; 而

当根区土壤水分亏缺造成植被蒸腾低于潜在蒸腾时，表层土壤无可利用水分供于蒸发）变化的新思路 and 梯形空间内临界边（即“土壤干边”，图4）的概念，并解译了土壤蒸发与植被蒸腾在梯形空间内的变化机制。随后，在不同的极限端元计算方案的基础上，Sun (2016) 和Tang和Li (2017) 分别进一步提出了基于地表温度—植被指数梯形空间的土壤蒸发与植被蒸腾分解的“两段分离法”模型（表3）。

为实现土壤温度与植被温度、土壤蒸发与植被蒸腾的分解，Tang 和 Li (2017) 所提出的“两段分离法”ESVEP (End-member-based Soil and Vegetation Energy Partitioning) 模型在梯形空间已有的干边和湿边概念基础上，创新性地定义了“临界干边”或称之为“土壤干边”（不同植被指数状况下表层相对土壤水分为0而根区相对土壤水分为1的这一临界状态，图4）的概念，并基于梯形空间的干燥裸土端元温度 (T_{sd}) 和湿润植被端元温度 (T_{vw})，结合植被覆盖度 (F_c)，实现临界干边温度 (T^*) 的确定。

$$T^* = (T_{sd}^4(1 - F_c) + T_{vw}^4 F_c)^{1/4} \quad (19)$$

当遥感影像像元的地表温度低于或者等于临界地表温度时 ($T_s \leq T^*$ ，图4)，表层土壤处于水分亏缺而根区土壤处于充分供水状态，即土壤蒸发受到胁迫而植被处于潜在蒸腾状态。相应的，像元的植被组分温度 (T_{veg})、土壤组分温度 (T_{soil})、植被蒸腾 (LE_{veg}) 和土壤蒸发 (LE_{soil}) 可由如下公式得到：

$$T_{veg} = T_{vw} \quad (20)$$

$$T_{soil} = \left((T_s^4 - F_c T_{veg}^4) / (1 - F_c) \right)^{1/4} \quad (21)$$

$$LE_{veg} = LE_{vw} \quad (22)$$

$$LE_{soil} = \frac{T_{sd} - T_{soil}}{T_{sd} - T_{sw}} LE_{sw} \quad (23)$$

当遥感影像像元的地表温度高于或者等于临界温度时 ($T_s \geq T^*$ ，图4)，表层土壤处于完全干燥而根区土壤处于水分亏缺状态，即表层土壤水分为0而植被蒸腾处于胁迫状态。相应的，像元的 T_{veg} 、 T_{soil} 、 LE_{veg} 和 LE_{soil} 可由如下公式得到：

$$T_{soil} = T_{sd} \quad (24)$$

$$T_{veg} = \left((T_s^4 - (1 - F_c) T_{soil}^4) / F_c \right)^{1/4} \quad (25)$$

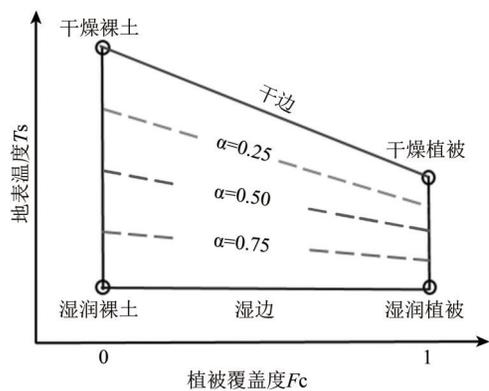
$$LE_{veg} = \frac{T_{vd} - T_{veg}}{T_{vd} - T_{vw}} LE_{vw} \quad (26)$$

$$LE_{soil} = LE_{sd} = 0 \quad (27)$$

式中，关于极限端元温度与其他各个变量的计算公式以及ESVEP模型的详情，请参见Tang和Li (2017)。

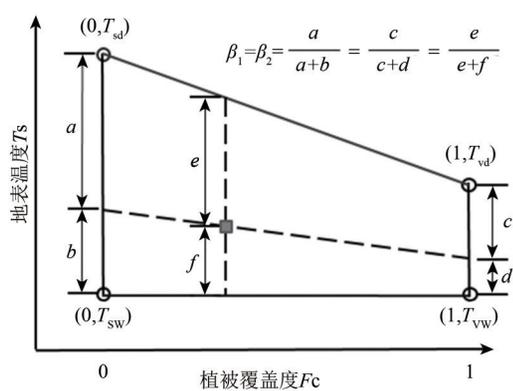
“两段分离法”ESVEP模型的提出，使得地表温度—植被指数三角空间与梯形空间成功衔接起来，保持了两者的空间在所涉物理概念、成因以及地表蒸散发反演方面的连贯性和一致性，完善了基于梯形空间分解土壤蒸发与植被蒸腾的理论。“两段分离法”与“同步分离法”的显著差异在于：“两段分离法”假定当土壤蒸发受到水分约束时，植被一直处于潜在蒸腾状态；当植被蒸腾受到水分约束时，土壤蒸发为0；而“同步分离法”认为表层土壤水分和根区土壤水分在梯形空间干边与湿边之间是由低到高同步变化的（即表层与根区具有相同的土壤水分含量等值线）。

由于在干湿边确定方法和蒸散发反演建模机理方面的差异，不同的“同步分离法”模型虽均取得了令人满意的地表总蒸散发估算精度，但它们在土壤蒸发和植被蒸腾的分离结果上却呈现显著区别 (Long 和 Singh, 2012; Yang 和 Shang, 2013; Yang 等, 2015)，而“同步分离法”与“两段分离法”模型之间更是会得到截然不同的土壤蒸发与植被蒸腾结果 (Jiang 等, 2019)。加之目前所有研究均针对梯形空间所估算的地表总蒸散发进行真实性检验，却未对分离的土壤蒸发和植被蒸腾进行验证，使研究者尚无法充分判断哪一种分离方案更为合理。需要指出的是，Tang 和 Li (2017) 所提出的“两段分离法”二源蒸散发模型，首先需要对目标像元的地表总净辐射进行土壤和植被各自组分的分解，然后再利用分解后的土壤净辐射和植被净辐射分别计算梯形空间土壤和植被组分的温度（简称“层状算法”）。与此不同，其他梯形空间均利用地表总净辐射开展极限端元温度的计算（简称“块状算法”）。此外，与多数研究均针对整个研究区构建三角/梯形空间不同，Yang 等 (2015)、Zhu 等 (2017a) 和 Tang 和 Li (2017) 所开展的地表温度—植被指数三角/梯形空间建模均是针对研究区内的每个像元进行的，从而可有效考虑不同植被类型或不同粗糙度高度的植被具有不同植被端元温度的问题。



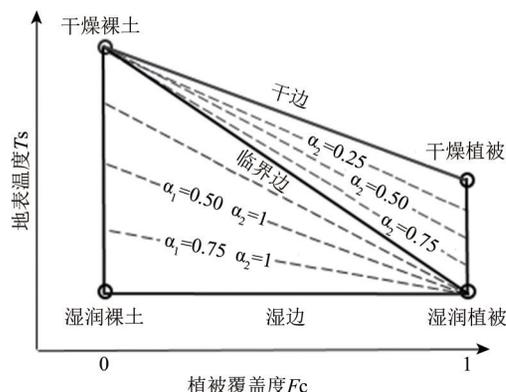
(a) 同步分离法中表层与根区相对土壤水分(α)变化等值线

(a) Contour of the relative soil moisture change (α) at the soil surface layer and the root zone layer in the simultaneous separation method



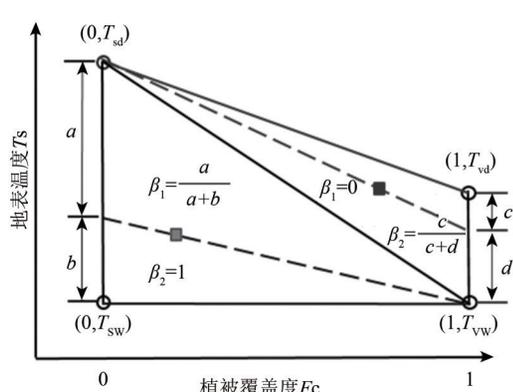
(b) 同步分离法中某一像元土壤温度与植被温度、土壤蒸发比与植被蒸腾比的解析方案。方块代表像元在梯形空间中的位置(β_1 代表土壤蒸发比, β_2 代表植被蒸腾比)

(b) Decomposition of soil temperature and vegetation temperature, soil evaporation fraction and vegetation transpiration fraction in the simultaneous separation method (The square represents the position of the pixel in the trapezoidal space. β_1 represents the soil evaporation fraction, and β_2 represents the vegetation transpiration fraction)



(c) 两段分离法中表层相对土壤水分变化等值线(α_1)与根区相对土壤水分变化等值线(α_2)

(c) Contour of relative surface soil moisture (α_1) change and relative root zone soil moisture (α_2) change in the two-stage separation method



(d) 两段分离法中不同表层与根区水分状态下的像元土壤温度与植被温度、土壤蒸发比与植被蒸腾比的解析方案。方块代表像元在梯形空间中的位置(β_1 代表土壤蒸发比, β_2 代表植被蒸腾比)

(d) Decomposition of soil temperature and vegetation temperature, soil evaporation fraction and vegetation transpiration fraction under different surface soil and root zone moisture conditions in the two-stage separation method (The squares represent the position of the pixels in the trapezoidal space. β_1 represents the soil evaporation fraction, and β_2 represents the vegetation transpiration fraction)

图4 基于地表温度—植被指数梯形空间分解土壤蒸发与植被蒸腾的“同步分离法”与“两段分离法”概念图

Fig. 4 The “simultaneous separation method” and the “two-stage separation method” for the decomposition of soil evaporation and vegetation transpiration based on land surface temperature–vegetation index trapezoidal space

2.2.3 三角空间和梯形空间的联系与区别

三角空间和梯形空间既有联系, 又有区别。与三角空间的建模相比, 梯形空间的建模一般需

要大量地面气象与植被观测数据的辅助, 而且通过梯形空间不仅可实现混合像元地表蒸散发的反演, 还可实现土壤蒸发与植被蒸腾的分离。

表3 代表性“同步分离法”与“两段分离法”土壤蒸发与植被蒸腾遥感分解模型性能比较

Table 3 Comparison of the performance of remote sensing decomposition models for soil evaporation and vegetation transpiration between representative “simultaneous separation method” and “two-stage separation method”

方法	模型	全称	是否考虑根区与表层土壤水分变化的差异	遥感数据源	研究区位置	ET反演误差	参考文献
同步分离法	PCACA+LEA	Pixel Component Arranging And Comparing Algorithm+ Layered Energy-separating Algorithm	否	MODIS	中国山东禹城作物站	48 W/m ²	Zhang等 (2005, 2008)
	TTME	Two-source Trapezoid Model for Evapotranspiration	否	TM/ETM+, ASTER	美国爱荷华州中部 SMACEX 作物站	45.6W/m ² 63.1W/m ²	Long 和 Singh (2012)
	ETEML	Enhanced Two-Source Evapotranspiration Model for Land	否	TM/ETM+	美国爱荷华州中部 SMACEX 作物站	59 W/m ²	Yang等 (2015)
	HTEM	Hybrid Dual-source Scheme and Trapezoid Framework-Based Evapotranspiration Model	否	TM/ETM+	美国爱荷华州中部 SMACEX 作物站； 中国山东微山站	31 W/m ² 45 W/m ²	Yang 和 Shang (2013)
两段分离法	TST	Two-Stage Trapezoid	是	MODIS	中国黑河流域盈科作物站	0.04— 0.07(蒸发比误差)	Sun(2016)
	ESVEP	End-member-based Soil and Vegetation Energy Partitioning	是	MODIS	中国山东禹城作物站	60 W/m ²	Tang(2015) Tang 和 Li (2017)

研究中简单地将基于三角空间提出来的蒸散发或土壤水分估算方法应用于梯形空间，而不考虑构成三角空间和梯形空间的物理机理的差异，会造成同一像元估算结果的不一致性甚至没有可比性。Sandholt等(2002)基于三角空间提出了著名的温度—植被干旱指数(TVDI)，基于该指数，研究者能够有效估算得到研究区内各像元的表层地表相对干湿状况及土壤水分。随后，Zhu等(2017b)基于梯形空间进一步提出了修正的温度—植被干旱指数(MTVDI)，并用于表层(0—5 cm)土壤湿度的计算。虽然这些三角空间和梯形空间在干燥裸土、湿润裸土和湿润植被三个极限端元方面具有相同的物理定义和特征，但所估算出来的干旱指数结果却可能会产生显著差异，估算结果的合理性也会存在较大的疑问。例如，对于位于三角空间内干边上的像元来说，由Sandholt等(2002)提出的三角空间方法所估算的干旱指数结果均为1(干湿边交叉处所对应的奇点除外)，而由Zhu等(2017b)提出的梯形空间方法所估算的干旱指数结果则会随着不同的植被覆盖情况在0到1之间变化；由两者干旱指数所进一步估算得到的像元土壤水分则会存在明显的不一致性。因而，迫切需要进一步厘清三角空间和梯形空间在形成机制上的差异，为发展机理明确、精度可靠的地

表蒸散发遥感反演方法提供科学基础。

事实上，三角空间法是在假定植被根区土壤无水分亏缺的前提下提出来的(Carlson 2013)，所估算的干旱指数仅仅反映了表层土壤水分的亏缺状况；而梯形空间法则可看作是三角空间在植被根区水分存在亏缺状况下的进一步扩展，所估算的干旱指数能够同时反映表层土壤和植被根区土壤的水分亏缺状况。

3 结 语

在过去20多年，基于地表温度—植被指数三角/梯形空间反演地表蒸散发及分离土壤蒸发与植被蒸腾的研究已经取得了长足进展，并通过不同的假设和解译机制，发展出了多种干湿边或极限端元温度确定方法以及蒸散发建模方案。但是，这些方法/方案仍存在较大的不足和不确定性。例如，针对极限端元或干湿边地表温度的确定，已有的经验回归法和理论计算法由于均利用卫星过境单一时刻信息，或者严重受制于研究区内卫星过境瞬时遥感数据的代表性，或者需要大量近地面数据辅助，而已有的长时间序列遥感数据法，虽提供了非常好的解决思路，但却造成理论上的不合理，导致现有各方法的实用性或蒸散发反演精度受到严重影响。鉴于此，还需针对地表温度—

植被指数三角/梯形特征空间的蒸散发反演或土壤蒸发/植被蒸腾分离建模开展进一步深入研究, 回答如下科学问题:

(1) 三角空间与梯形空间在机理上有何联系与差异? 蒸散发及土壤蒸发/植被蒸腾在三角/梯形特征空间内随着土壤水分和植被指数到底是如何变化的? 不同的解译方案对蒸散发反演结果有多大程度的影响?

(2) 现有的代表性干湿边或极限端元确定方案所估算出来的极限端元温度有多大的差异? 合理性如何? 对土壤蒸发与植被蒸腾的分离有多大的影响?

(3) 不同植被类型具有不同的阻抗特征。针对整个研究区, 仅利用一套干湿边或极限端元的参数化方案, 而不考虑不同植被类型的差异, 对地表蒸散发的遥感反演具有多大的影响? 是否合理? 是否有必要针对不同的植被类型分别构建各自的干湿边或极限端元估算模型?

(4) “同步分离法”与“两段分离法”对于不同的植被类型(如林地、草地、作物等)的适用条件是否一致? 两类方法的分离结果有何联系与差异? 哪种分离方案更为合理?

(5) 所有研究均针对梯形空间所估算的地表总蒸散发进行真实性检验, 而未对分解的土壤和植被组分温度以及土壤蒸发和植被蒸腾进行验证, 使研究者无法充分判断哪一种分离方案更为合理? 此外, 通过各种“同步分离法”和“两段分离法”二源蒸散发遥感反演模型, 所分解的混合像元土壤和植被温度组分以及分离的土壤蒸发和植被蒸腾, 各有什么样的联系与差异?

(6) 由于地表温度随大气强迫的改变而变化显著, 绝大多数基于三角/梯形特征空间反演地表蒸散发或分离土壤蒸发/植被蒸腾的研究, 均需要针对每一个卫星过境时刻开展干湿边或极限端元温度的确定, 而已有的基于长时间序列遥感数据确定极限端元温度的方法所确定的极限端元温度已经偏离了其原有的物理含义(某给定大气强迫条件下对应的干燥裸土温度), 且会存在较大偏差, 从而给反演结果带来较高不确定性。考虑到地表温度—植被指数特征空间本质上是利用地表温度的高低来指示土壤水分的亏缺状况, 而地表温度对大气强迫的变化非常敏感且难以确定, 能否利用遥感数据的时空变化信息发展出一种无需

确定特征空间干湿边或极限端元地表温度的蒸散发遥感反演新方法? 或者, 能否进一步开展基于长时间序列遥感数据确定干湿边或极限端元的深入研究, 发展出物理意义正确、精确度高且可操作性强的通用干湿边或极限端元确定方法?

为正确揭示地表蒸散发在地表温度—植被指数特征空间内的变化规律, 提高基于特征空间估算地表蒸散发的精度与业务化运行能力, 亟需进一步开展基于特征空间反演地表蒸散发和分离土壤蒸发/植被蒸腾的机理研究以及发展出精度高、可操作性强的特征空间干湿边确定新方法。

就目前已存在的方法来说, 由于需要利用由热红外波段数据反演得到的地表温度作为核心输入, 基于地表温度—植被指数三角/梯形特征空间所估算得到的地表蒸散发及土壤蒸发/植被蒸腾, 其空间分辨率也会低于基于可见光波段反演结果的空间分辨率。同时, 这类特征空间仅能应用于那些同时搭载可见光和热红外波段传感器的卫星数据, 导致该类方法在未搭载热红外传感器的卫星(如Sentinel-2)上无法应用。此外, 地表温度—植被指数三角/梯形特征空间易受大气强迫的改变而显著变化, 导致干湿边所对应的地表温度时刻不同。为充分发挥三角/梯形空间在地表蒸散发遥感反演方面所具有的独特优势, 有必要发展出一种仅依靠具有较高空间分辨率的可见光/近红外/短波红外数据来构建三角/梯形特征空间并进行地表蒸散发遥感反演的新方法, 提高三角/梯形特征空间对于不同遥感数据源的可用性以及所估算地表蒸散发的空间分辨率。Sadeghi等(2017)和Babaian等(2018)基于短波红外反射率数据和归一化植被指数NDVI新近提出了一个光学梯形空间, 成功用于较高空间分辨率(与热红外数据相比)地表土壤水分的遥感反演。该光学梯形空间主要受地表土壤水分的影响, 其干湿边仅仅反映了土壤水分状况的高低, 而对大气强迫的改变不敏感, 且数据具有相对更高的空间分辨率, 因而具有重要的应用潜力。除此之外, 卫星遥感硬件设备和软件技术的提升也会对地表蒸散发的反演起到一定的推动作用。例如, 现有高、超分辨率遥感技术和多源数据融合技术逐渐走向成熟, 将有助于极端水分条件下土壤和植被端元地表温度的确定; 多角度热红外传感器的发展将有助于混合像元地表温度的分解, 对土壤蒸发与植被蒸腾

的高精度分离具有重要的意义。同时, 基于组网导航卫星(如我国北斗导航卫星系列)反射测量(GNSS-R)的土壤湿度反演, 具有高覆盖、高时空分辨率等优势, 将有助于提高地表蒸发比的反演精度。

综上所述, 本文在充分总结国内外已有研究成果的基础上, 针对地表温度—植被指数特征空间反演地表蒸散发所存在的不足, 未来工作建议首先利用模型模拟数据、地面观测数据, 并结合模型比较、理论分析、数学推导等手段, 全面深入研究并厘清三角空间与梯形空间在所涉物理概念、成因以及反演结果方面的一致性、差异性和兼容性、“同步分离法”与“两段分离法”的适用性和在土壤蒸发/植被蒸腾分离方面的联系与区别, 探明特征空间内蒸散发和土壤蒸发/植被蒸腾随土壤水分及植被指数等的变化规律。在此基础上, 可以考虑利用长时间序列遥感数据, 借助于地表温度—植被指数负相关关系(即空间信息)在土壤水分反演方面的成功应用(Carlson等, 1990; Goward等, 2002; Sandholt等, 2002), 发展出无需确定特征空间干湿边或极限端元地表温度的蒸散发遥感反演新模型; 同时, 基于新近提出的短波红外反射率—植被指数梯形特征空间(Sadeghi等, 2017; Babaeian等, 2018)所具有的土壤水分反演精度高和受大气强迫变化影响小的优势, 可尝试建立基于短波红外反射率—植被指数特征空间的地表蒸散发反演模型。

参考文献(References)

- Allen R G, Tasumi M, and Trezza R. 2007. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4)
- Anderson M C, Norman J M, Diak G R, Kustas W P, and Mecikalski J R. 1997. A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 60(2): 195-216 [DOI: 10.1016/s0034-4257(96)00215-5]
- Babaeian E, Sadeghi M, Franz T E, Jones S, and Tuller M. 2018. Mapping soil moisture with the OPTical TRapezoid Model (OPTRAM) based on long-term MODIS observations. *Remote Sensing of Environment*, 211:425-40 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.04.029]
- Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, and Holtslag A A M. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212
- Bhattarai N, Quackenbush L J, Im J, and Shaw S B. 2017. A new optimized algorithm for automating endmember pixel selection in the SEBAL and METRIC models. *Remote Sensing of Environment*, 196:178-92 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.05.009]
- Carlson T. 2007. An overview of the "triangle method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery. *Sensors*, 7(8):1612-29 [DOI: 10.3390/s7081612]
- Carlson T N. 2013. Triangle Models and Misconceptions. *International Journal of Remote Sensing Applications*, 3(3)
- Carlson T N, Perry E M, and Schmugge T J. 1990. Remote estimation of soil-moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields. *Agricultural and Forest Meteorology*, 52(1-2):45-69 [DOI: 10.1016/0168-1923(90)90100-k]
- Carlson T N, and Petropoulos G P. 2019. A new method for estimating of evapotranspiration and surface soil moisture from optical and thermal infrared measurements: the simplified triangle. *International Journal of Remote Sensing*, 40(20):7716-29 [DOI: 10.1080/01431161.2019.1601288]
- Carter C, and Liang S. 2019. Evaluation of ten machine learning methods for estimating terrestrial evapotranspiration from remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78:86-92 [DOI: 10.1016/j.jag.2019.01.020]
- Chen J M, and Liu J. 2020. Evolution of evapotranspiration models using thermal and shortwave remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 237 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111594]
- Chen X, Su Z, Ma Y, Yang K, and Wang B. 2013. Estimation of surface energy fluxes under complex terrain of Mt. Qomolangma over the Tibetan Plateau. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(4):1607-18 [DOI: 10.5194/hess-17-1607-2013]
- de Tomas A, Nieto H, Guzinski R, Salas J, Sandholt I, and Berliner P. 2014. Validation and scale dependencies of the triangle method for the evaporative fraction estimation over heterogeneous areas. *Remote Sensing of Environment*, 152:493-511 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.06.028]
- Fisher J B, Tu K P, and Baldocchi D D. 2008. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. *Remote Sensing of Environment*, 112(3):901-19 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.06.025]
- Gan G, Kang T, Yang S, Bu J, Feng Z, and Gao Y. 2019. An optimized two source energy balance model based on complementary concept and canopy conductance. *Remote Sensing of Environment*, 223:243-56 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.01.020]
- Garcia M, Fernandez N, Villagarcia L, Domingo F, Puigdefabregas J, and Sandholt I. 2014. Accuracy of the Temperature-Vegetation Dryness Index using MODIS under water-limited vs. energy-limited evapotranspiration conditions. *Remote Sensing of Environment*, 149:100-17 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.04.002]
- Gillies R R, Carlson T N, Cui J, Kustas W P, and Humes K S. 1997. A verification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the

- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 18(15): 3145-66 [DOI: 10.1080/014311697217026]
- Goward S N, Cruickshanks G D, and Hope A S. 1985. Observed relation between thermal emission and reflected spectral radiance of a complex vegetated landscape. *Remote Sensing of Environment*, 18(2):137-46 [DOI: 10.1016/0034-4257(85)90044-6]
- Goward S N, Xue Y K, and Czajkowski K P. 2002. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements-An exploration with the simplified simple biosphere model. *Remote Sensing of Environment*, 79(2-3):225-42 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00275-9]
- Hu G, Jia L, and Menenti M. 2015. Comparison of MOD16 and LSA-SAF MSG evapotranspiration products over Europe for 2011. *Remote Sensing of Environment*, 156:510-26 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.10.017]
- Hu X, Ren H, Tansey K, Zheng Y, Ghent D, Liu X, and Yan L. 2019. Agricultural drought monitoring using European Space Agency Sentinel 3A land surface temperature and normalized difference vegetation index imageries. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.107707]
- Hu X, Shi L, Lin L, and Zha Y. 2019. Nonlinear boundaries of land surface temperature-vegetation index space to estimate water deficit index and evaporation fraction. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.107736]
- Jia L, Su Z B, van den Hurk B, Menenti M, Moene A, De Bruin H A R, Yrisarry J J B, Ibanez M, and Cuesta A. 2003. Estimation of sensible heat flux using the Surface Energy Balance System (SEBS) and ATSR measurements. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28(1-3):75-88 [DOI: 10.1016/S1474-7065(03)00009-3]
- Jiang L, and Islam S. 1999. A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations. *Geophysical Research Letters*, 26(17)
- Jiang L, and Islam S. 2003. An intercomparison of regional latent heat flux estimation using remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 24(11):2221-36 [DOI: 10.1080/01431160210154821]
- Jiang L, Islam S, Guo W, Jutla A S, Senarath S U S, Ramsay B H, and Eltahir E A B. 2009. A satellite-based Daily Actual Evapotranspiration estimation algorithm over South Florida. *Global and Planetary Change*, 67(1-2):62-77 [DOI: 10.1016/j.gloplacha.2008.12.008]
- Jiang Y, Tang R, Jiang X, Li Z-L, and Gao C. 2019. Estimation of Soil Evaporation and Vegetation Transpiration Using Two Trapezoidal Models From MODIS Data. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 124(14):7647-64 [DOI: 10.1029/2019jd030542]
- Jung M, Koirala S, Weber U, Ichii K, Gans F, Camps-Valls G, Papale D, Schwalm C, Tramontana G, and Reichstein M. 2019. The FLUXCOM ensemble of global land-atmosphere energy fluxes. *Scientific Data*, 6 [DOI: 10.1038/s41597-019-0076-8]
- Kalma J D, McVicar T R, and McCabe M F. 2009. Estimating Land Surface Evaporation: A Review of Methods Using Remotely Sensed Surface Temperature Data. *Surveys in Geophysics*, 29(4-5)
- Khan M S, Liaqat U W, Baik J, and Choi M. 2018. Stand-alone uncertainty characterization of GLEAM, GLDAS and MOD16 evapotranspiration products using an extended triple collocation approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 252: 256-68 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.01.022]
- Kustas W, and Anderson M. 2009. Advances in thermal infrared remote sensing for land surface modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(12)
- Lambin E F, and Ehrlich D. 1996. The surface temperature-vegetation index space for land cover and land-cover change analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 17(3)
- Li Z-L, Tang R L, Wan Z M, Bi Y Y, Zhou C H, Tang B H, Yan G J, and Zhang X Y. 2009. A Review of Current Methodologies for Regional Evapotranspiration Estimation from Remotely Sensed Data. *Sensors*, 9(5):3801-53 [DOI: 10.3390/s90503801]
- Liu K, Su H, Tian J, Li X, Wang W, Yang L, and Liang H. 2018. Assessing a scheme of spatial-temporal thermal remote-sensing sharpening for estimating regional evapotranspiration. *International Journal of Remote Sensing*, 39(10):3111-37 [DOI: 10.1080/01431161.2018.1434326]
- Liu S, Xu Z, Song L, Zhao Q, Ge Y, Xu T, Ma Y, Zhu Z, Jia Z, and Zhang F. 2016. Upscaling evapotranspiration measurements from multi-site to the satellite pixel scale over heterogeneous land surfaces. *Agricultural and Forest Meteorology*, 230:97-113 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.04.008]
- Liu Y, Hiyama T, Yasunari T, and Tanaka H. 2012. A nonparametric approach to estimating terrestrial evaporation: Validation in eddy covariance sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 157: 49-59 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.01.012]
- Long D, and Singh V P. 2012. A Two-source Trapezoid Model for Evapotranspiration (TTME) from satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 121:370-88 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.02.015]
- Long D, Singh V P, and Scanlon B R. 2012. Deriving theoretical boundaries to address scale dependencies of triangle models for evapotranspiration estimation (vol 112, D05113, 2012). *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 117 [DOI: 10.1029/2012jd017763]
- Lu J, Li Z-L, Tang R, Tang B-H, Wu H, Yang F, Labed J, and Zhou G. 2013. Evaluating the SEBS-estimated evaporative fraction from MODIS data for a complex underlying surface. *Hydrological Processes*, 27(22):3139-49 [DOI: 10.1002/hyp.9440]
- Ma Y, Liu S, Song L, Xu Z, Liu Y, Xu T, and Zhu Z. 2018. Estimation of daily evapotranspiration and irrigation water efficiency at a Landsat-like scale for an arid irrigation area using multi-source remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 216: 715-34 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.07.019]
- Merlin O, Chirouze J, Olioso A, Jarlan L, Chehbouni G, and Boulet G. 2014. An image-based four-source surface energy balance model to estimate crop evapotranspiration from solar reflectance/thermal emission data (SEB-4S). *Agricultural and Forest Meteorology*,

- 184:188-203 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.10.002]
- Minacapilli M, Consoli S, Vanella D, Ciraolo G, and Motisi A. 2016. A time domain triangle method approach to estimate actual evapotranspiration: Application in a Mediterranean region using MODIS and MSG-SEVIRI products. *Remote Sensing of Environment*, 174:10-23 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.018]
- Mohseni F, and Mokhtarzade M. 2020. A new soil moisture index driven from an adapted long-term temperature-vegetation scatter plot using MODIS data. *Journal of Hydrology*, 581 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124420]
- Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, and Vidal A. 1994. Estimating crop water-deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 49(3):246-63 [DOI: 10.1016/0034-4257(94)90020-5]
- Moran M S, Rahman A F, Washburne J C, Goodrich D C, Weltz M A, and Kustas W P. 1996. Combining the Penman-Monteith equation with measurements of surface temperature and reflectance to estimate evaporation rates of semiarid grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 80(2-4): 87-109 [DOI: 10.1016/0168-1923(95)02292-9]
- Mu Q, Zhao M, and Running S W. 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 115(8):1781-800 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.02.019]
- Nishida K, Nemani R R, Running S W, and Glassy J M. 2003. An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation. Kenlo Nishida; Ramakrishna R. Nemani; Steven W. Running; Joseph M. Glassy, 108(D9)
- Norman J M, Kustas W P, and Humes K S. 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface-temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3-4):263-93 [DOI: 10.1016/0168-1923(95)02265-y]
- Olioso A, Chauki H, Courault D, and Wigneron J P. 1999. Estimation of evapotranspiration and photosynthesis by assimilation of remote sensing data into SVAT models. *Remote Sensing of Environment*, 68(3):341-56 [DOI: 10.1016/s0034-4257(98)00121-7]
- Pan X, Liu Y, Gan G, Fan X, and Yang Y. 2017. Estimation of Evapotranspiration Using a Nonparametric Approach Under All Sky: Accuracy Evaluation and Error Analysis. *Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(6): 2528-39 [DOI: 10.1109/jstars.2017.2707586]
- Peng J, Liu Y, Zhao X, and Loew A. 2013. Estimation of evapotranspiration from MODIS TOA radiances in the Poyang Lake basin, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(4): 1431-44 [DOI: 10.5194/hess-17-1431-2013]
- Petropoulos G, Carlson T N, Wooster M J, and Islam S. 2009. A review of T-s/VI remote sensing based methods for the retrieval of land surface energy fluxes and soil surface moisture. *Progress in Physical Geography-Earth and Environment*, 33(2):224-50 [DOI: 10.1177/0309133309338997]
- Price J C. 1990. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(5):940-8 [DOI: 10.1109/36.58983]
- Qiu G Y, Li C, and Yan C. 2015. Characteristics of soil evaporation, plant transpiration and water budget of Nitraria dune in the arid Northwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 203:107-17 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2015.01.006]
- Sadeghi M, Babaeian E, Tuller M, and Jones S B. 2017. The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations. *Remote Sensing of Environment*, 198:52-68 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.05.041]
- Sandholt I, Rasmussen K, and Andersen J. 2002. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79(2-3):213-24 [DOI: 10.1016/s0034-4257(01)00274-7]
- Shekar S N C, and Nandagiri L. 2020. A Penman-Monteith evapotranspiration model with bulk surface conductance derived from remotely sensed spatial contextual information. *International Journal of Remote Sensing*, 41(4):1486-511 [DOI: 10.1080/01431161.2019.1668074]
- Song L, Liu S, Kustas W P, Nieto H, Sun L, Xu Z, Skaggs T H, et al. 2018. Monitoring and validating spatially and temporally continuous daily evaporation and transpiration at river basin scale. *Remote Sensing of Environment*, 219:72-88 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.10.002]
- Song L, Liu S, Kustas W P, Zhou J, Xu Z, Xia T, and Li M. 2016. Application of remote sensing-based two-source energy balance model for mapping field surface fluxes with composite and component surface temperatures. *Agricultural and Forest Meteorology*, 230:8-19 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.01.005]
- Stisen S, Sandholt I, Norgaard A, Fensholt R, and Jensen K H. 2008. Combining the triangle method with thermal inertia to estimate regional evapotranspiration-Applied to MSG-SEVIRI data in the Senegal River basin. *Remote Sensing of Environment*, 112(3): 1242-55 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.08.013]
- Su Z. 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1):85-99 [DOI: 10.5194/hess-6-85-2002]
- Sun H. 2016. Two-Stage Trapezoid: A New Interpretation of the Land Surface Temperature and Fractional Vegetation Coverage Space. *Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(1):336-46 [DOI: 10.1109/jstars.2015.2500605]
- Sun H, Wang Y, Liu W, Yuan S, and Nie R. 2017. Comparison of Three Theoretical Methods for Determining Dry and Wet Edges of the LST/FVC Space: Revisit of Method Physics. *Remote Sensing*, 9(6) [DOI: 10.3390/rs9060528]
- Sun L, Sun R, Li X, Liang S, and Zhang R. 2012. Monitoring surface soil moisture status based on remotely sensed surface temperature and vegetation index information. *Agricultural and Forest Meteorology*, 166:175-87 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.07.015]
- Tagesson T, Horion S, Nieto H, Fornies V Z, Gonzalez G M, Bulgin C E, Ghent D, and Fensholt R. 2018. Disaggregation of SMOS soil

- moisture over West Africa using the Temperature and Vegetation Dryness Index based on SEVIRI land surface parameters. *Remote Sensing of Environment*, 206:424-41 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.12.036]
- Tang R, and Li Z L. 2015. Evaluation of two end-member-based models for regional Land Surface evapotranspiration estimation from MODIS data. *Agricultural and Forest meteorology*, 202, 69-82 [DOI: 10.1016/j.agrmet.2014.12.035]
- Tang R, and Li Z L. 2017. An End-Member-Based Two-Source Approach for Estimating Land Surface Evapotranspiration From Remote Sensing Data. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(10):5818-32 [DOI: 10.1109/tgrs.2017.2715361]
- Tang R, Li Z L, and Tang B. 2010. An application of the T-s-VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: Implementation and validation. *Remote Sensing of Environment*, 114(3):540-51 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.10.012]
- Tang R, Li Z-L, Tang B, HuaWu, and Ieee. 2015. Interpretation of surface temperature/vegetation index space for evapotranspiration estimation from svat modeling. In 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2028-30
- Tian J, Su H, Sun X, Chen S, He H, and Zhao L. 2013. Impact of the Spatial Domain Size on the Performance of the T-s-VI Triangle Method in Terrestrial Evapotranspiration Estimation. *Remote Sensing*, 5(4):1998-2013 [DOI: 10.3390/rs5041998]
- Wang K, and Dickinson R E. 2012. A Review of global terrestrial evapotranspiration: observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Reviews of Geophysics*, 50 [DOI: 10.1029/2011rg000373]
- Wang K, Wang P, Li Z, Cribb M, and Sparrow M. 2007. A simple method to estimate actual evapotranspiration from a combination of net radiation, vegetation index, and temperature. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 112(D15) [DOI: 10.1029/2006jd008351]
- Wang K C, Li Z Q, and Cribb M. 2006. Estimation of evaporative fraction from a combination of day and night land surface temperatures and NDVI: A new method to determine the Priestley-Taylor parameter. *Remote Sensing of Environment*, 102(3-4): 293-305 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.02.007]
- Wang L, Guo N, Wang X, and Wang W. 2017. Effects of Spatial Resolution for Evapotranspiration Estimation by Using the Triangular Method Over Heterogeneous Underlying Surface. *Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(6):2518-27 [DOI: 10.1109/jstars.2017.2711198]
- Wang Y, Li R, Min Q, Fu Y, Wang Y, Zhong L, and Fu Y. 2019. A three-source satellite algorithm for retrieving all-sky evapotranspiration rate using combined optical and microwave vegetation index at twenty AsiaFlux sites. *Remote Sensing of Environment*, 235 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111463]
- Wu B, Zhu W, Yan N, Feng X, Xing Q, and Zhuang Q. 2016. An Improved Method for Deriving Daily Evapotranspiration Estimates From Satellite Estimates on Cloud-Free Days. *Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(4):1323-30 [DOI: 10.1109/jstars.2015.2514121]
- Xiong Y J, Zhao S H, Tian F, and Qiu G Y. 2015. An evapotranspiration product for arid regions based on the three-temperature model and thermal remote sensing. *Journal of Hydrology*, 530: 392-404 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.09.050]
- Xu T, Guo Z, Liu S, He X, Meng Y, Xu Z, Xia Y, et al. 2018. Evaluating Different Machine Learning Methods for Upscaling Evapotranspiration from Flux Towers to the Regional Scale. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 123(16):8674-90 [DOI: 10.1029/2018jd028447]
- Xu T, He X, Bateni S M, Auligne T, Liu S, Xu Z, Zhou J, and Mao K. 2019. Mapping regional turbulent heat fluxes via variational assimilation of land surface temperature data from polar orbiting satellites. *Remote Sensing of Environment*, 221:444-61 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.023]
- Xu Z, Liu S, Li X, Shi S, Wang J, Zhu Z, Xu T, Wang W, and Ma M. 2013. Intercomparison of surface energy flux measurement systems used during the HiWATER-MUSOEXE. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 118(23):13140-57 [DOI: 10.1002/2013jd020260]
- Yang Y, and Shang S. 2013. A hybrid dual-source scheme and trapezoid framework-based evapotranspiration model (HTEM) using satellite images: Algorithm and model test. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 118(5):2284-300 [DOI: 10.1002/jgrd.50259]
- Yang Y, Su H, Zhang R, Tian J, and Li L. 2015. An enhanced two-source evapotranspiration model for land (EEMTL): Algorithm and evaluation. *Remote Sensing of Environment*, 168: 54-65 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.06.020]
- Yao Y, Liang S, Li X, Chen J, Wang K, Jia K, Cheng J, et al. 2015. A satellite-based hybrid algorithm to determine the Priestley-Taylor parameter for global terrestrial latent heat flux estimation across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment*, 165: 216-33 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.05.013]
- Yuan W, Liu S, Yu G, Bonnefond J-M, Chen J, Davis K, Desai A R, et al. 2010. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, 114(7): 1416-31 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.01.022]
- Zare M, Drastig K, and Zude-Sasse M. 2020. Tree Water Status in Apple Orchards Measured by Means of Land Surface Temperature and Vegetation Index (LST-NDVI) Trapezoidal Space Derived from Landsat 8 Satellite Images. *Sustainability*, 12(1) [DOI: 10.3390/su12010070]
- Zhang D, Tang R, Tang B-H, Wu H, and Li Z-L. 2015. A Simple Method for Soil Moisture Determination From LST-VI Feature Space Using Nonlinear Interpolation Based on Thermal Infrared Remotely Sensed Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(2):638-48 [DOI: 10.11

- 09/jstars.2014.2371135]
- Zhang H, Gorelick S M, Avisse N, Tilmant A, Rajsekhar D, and Yoon J. 2016. A New Temperature-Vegetation Triangle Algorithm with Variable Edges (TAVE) for Satellite-Based Actual Evapotranspiration Estimation. *Remote Sensing*, 8(9) [DOI: 10.3390/rs8090735]
- Zhang K, Kimball J S, and Running S W. 2016. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Water*, 3(6): 834-53 [DOI: 10.1002/wat2.1168]
- Zhang R, Tian J, Su H, Sun X, Chen S, and Xia J. 2008. Two Improvements of an Operational Two-Layer Model for Terrestrial Surface Heat Flux Retrieval. *Sensors*, 8(10): 6165-87 [DOI: 10.3390/s8106165]
- Zhang R H, Sun X M, Wang W M, Xu J P, Zhu Z L, and Tian J. 2005. An operational two-layer remote sensing model to estimate surface flux in regional scale: Physical background. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 48:225-44
- Zhang Y, Kong D, Gan R, Chiew F H S, McVicar T R, Zhang Q, and Yang Y. 2019. Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002-2017. *Remote Sensing of Environment*, 222:165-82 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.12.031]
- Zhao W, Li A, Jin H, Zhang Z, Bian J, and Yin G. 2017. Performance Evaluation of the Triangle-Based Empirical Soil Moisture Relationship Models Based on Landsat-5 TM Data and In Situ Measurements. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(5):2632-45 [DOI: 10.1109/tgrs.2017.2649522]
- Zhao X, and Liu Y. 2014. Relative Contribution of the Topographic Influence on the Triangle Approach for Evapotranspiration Estimation over Mountainous Areas. *Advances in Meteorology*, 2014 [DOI: 10.1155/2014/584040]
- Zhu W, Jia S, and Lv A. 2017a. A Universal T-s-VI Triangle Method for the Continuous Retrieval of Evaporative Fraction From MODIS Products. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 122(19):10406-27 [DOI: 10.1002/2017jd026964]
- Zhu W, Jia S, and Lv A. 2017b. A time domain solution of the Modified Temperature Vegetation Dryness Index (MTVDI) for continuous soil moisture monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 200:1-17 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.07.032]
- Gao Y C, Long D. 2008. Advances in remote sensing ET modeling. *Journal of Remote Sensing*, (03):515-28 (高彦春, 龙笛. 2008. 遥感蒸散发模型研究进展. *遥感学报*, (03):515-28)
- Song L S, Liu S M, Xu T R, Xu Z W, and Ma Y F. 2017. Estimation and verification of soil evaporation and vegetation transpiration. *Journal of Remote Sensing*, 21(06):966-81 (宋立生, 刘绍民, 徐同仁, 徐自为, 马燕飞. 2017. 土壤蒸发和植被蒸腾遥感估算与验证. *遥感学报*, 21(06):966-81)
- Tang R L. 2011. Research on remote sensing retrieval method of land surface evapotranspiration based on the characteristic space of land surface temperature and vegetation coverage. Graduate School of Chinese Academy of Sciences (唐荣林. 2011. 基于地表温度—植被覆盖度特征空间的地表蒸散发遥感反演方法研究. 中国科学院研究生院)
- Zhou T, Peng Z Q, Xin X Z, and Li F G. 2016. Research Review on non-uniform surface evapotranspiration Remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 20(02):257-77 (周倜, 彭志晴, 辛晓洲, 李福根. 2016. 非均匀地表蒸散发遥感研究综述. *遥感学报*, 20(02):257-77)

A review of retrieval of land surface evapotranspiration based on remotely sensed surface temperature versus vegetation index triangular/trapezoidal characteristic space

TANG Ronglin^{1,2}, WANG Shengli^{1,2}, JIANG Yazhen^{1,2}, LI Zhaoliang^{1,2}, LIU Meng³, TANG Bohui^{1,2}, WU Hua^{1,2}

1. State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Agricultural Remote Sensing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Land surface Evapotranspiration (ET) is an important component of surface water cycle and energy balance, and its accurate estimation is essential for agricultural irrigation and drought monitoring, water resources management and climate change prediction. Retrieval of land surface ET based remotely sensed surface temperature versus vegetation index triangular/trapezoidal characteristic space is one of the international hot spots and frontier topics in the quantitative remote sensing of surface evapotranspiration. Due to the unclear understanding of the soil evaporation/vegetation transpiration processes and mechanisms, the interpretation schemes of retrieval models differ significantly for the scientific question of how soil evaporation/vegetation transpiration in characteristic space changes with surface

soil moisture and vegetation coverage (including cover type and coverage), resulting in significant differences in ET retrieval results between different models. This paper comprehensively, systematically and deeply reviews the research on surface ET retrieval and soil evaporation/vegetation transpiration separation based on surface temperature versus vegetation index triangular/trapezoidal characteristic space. The basic theories, advantages and disadvantages of each method for the determination of dry/wet edges and ET retrieval modeling are described in detail, the applicable conditions of each method are clarified, and the problems to be solved are sorted out. Based on these, this paper finally points out the future development direction of the remote sensing retrieval of ET in the triangular/trapezoidal characteristic space. To correctly reveal the variation law of land surface ET in the triangular/trapezoidal characteristic space of surface temperature-vegetation index and improve the accuracy and operational capability of surface ET estimation based on characteristic space, several suggestions for future research are proposed as follows: First, using model simulation data, ground observation data, and combining model comparison, theoretical analysis, mathematical derivation to comprehensively and thoroughly study the agreement, differences and compatibility between the triangular and trapezoidal characteristic space in terms of the physical concepts, causes, and retrieval results. Then clarifying the applicability, the connection and difference in the separation of soil evaporation/vegetation transpiration between the "simultaneous separation method" and the "two-stage separation method", and investigating the variation of ET and soil evaporation/vegetation transpiration in characteristic space with the change of soil moisture and vegetation index. Finally, with the use of long-term remote sensing data and the successful application of the negative correlation between land surface temperature and vegetation index (i.e., spatial information) in the retrieval of soil moisture, developing a new model for remote sensing retrieval of ET of a characteristic space without the determination of dry and wet edges or end-member land surface temperature. Meanwhile, based on the recently proposed shortwave infrared reflectance-vegetation index trapezoidal characteristic space, which has the advantages of high soil moisture retrieval accuracy and less impact by atmospheric forcing changes, the establishment of surface ET retrieval models can be based on the shortwave infrared reflectance-vegetation index characteristic space. Through this paper, it is helpful to further understand the mechanism of land surface ET retrieval based on the triangle/trapezoid characteristic space, provide inspiration for the establishment of new methods for remote sensing retrieval of ET and soil evaporation/vegetation transpiration separation, and promote the research level of quantitative remote sensing of evapotranspiration in China.

Key words: land surface evapotranspiration, remote sensing, surface temperature versus vegetation index triangular/trapezoidal characteristic space, determination of dry and wet edges, evaporation and transpiration

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41922009, 42071332, 42001306); National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFA0605401); Fundamental Research Funds for Central Non-profit Scientific Institution (No.1610132020007)