
崔要奎等在农业灌区蒸散发组分分离方面取得突破

作者：writer 来源：爱科学

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/14634.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

崔要奎等在农业灌区蒸散发组分分离方面取得突破。

【摘要】

蒸散发（ET）是陆表-大气间进行水-能量交换的主要过程。土壤-植被系统蒸散发全要素主要包括土壤蒸发、植被蒸腾和植被降雨截留，组分分离是获取蒸散发全要素的前提。蒸散发全要素数据对于优化水资源管理、削减无效蒸散发、提高灌溉效率、保护地下水资源和作物估产等具有重要意义。全球水资源发展公报显示，农业用水占用了社会用水总量的69%，在全球变化和人类活动加剧的时代背景下，对农业灌区蒸散发及组分分离开展研究显得尤为必要和迫切。

目前主要有三大类方法可以估算灌区蒸散发：（1）以热红外遥感数据为主要依赖的遥感蒸散发模型；（2）以空气动力学理论为核心的气象蒸散发模型；（3）以水量平衡模拟为核心的水文蒸散发模拟方法。各类方法优缺点主要在于：遥感蒸散发模型精度较高，但时空不连续；气象蒸散发模型机理性强，但涉及多种难以有效确定的经验参数（例如：植被冠层最小阻抗不同研究取值在20-180 m/s之间，导致植被冠层阻抗估算结果相差近9倍），输入数据种类繁多且质量参差不齐，导致整体复杂难用；水文蒸散发模拟方法，因缺少区域灌溉信息，在灌区表现欠佳。

为解决上述问题，北京大学遥感与地理信息系统研究所崔要奎老师（第一作者、通讯作者）、范闻捷研究员及中国科学院空天信息创新研究院贾立研究员，基于前期研发的考虑植被全要素、遥感像元内部植被分布非均匀性和降水截留物理过程的区域尺度植被降雨截留遥感物理模型RS-Gash基础（Cui et al., 2015, IEEE GRSL），通过改进型粒子群智能优化算法耦合TSVI（surface temperature-vegetation index）遥感蒸散发模型和SW（Shuttleworth-Wallace）气象蒸散发模型，提出了遥感气象蒸散发耦合模型（SW_TVI），实现了全天候土壤蒸发-植被蒸腾的有效分离，在我国黑河流域中部灌区多个站点的对比验证，表明其具有较强的稳定性和可靠的精度，能够满足我国长江以北半湿润-半干旱-干旱地区相关研究和应用的需求。研究成果近期以Estimation of actual evapotranspiration and its components in an irrigated area by integrating the Shuttleworth-Wallace and surface temperature-vegetation index schemes using the particle swarm optimization algorithm为题，发表于农林气象领域顶级期刊Agricultural And Forest Meteorology（中科院1区）。至此，已形成土壤蒸发-植被蒸腾-降雨截留蒸散发全要素估算和分离完整技术体系，未来将有效服务于水文水利农业等领域。



Estimation of actual evapotranspiration and its components in an irrigated area by integrating the Shuttleworth-Wallace and surface temperature-vegetation index schemes using the particle swarm optimization algorithm

Yaokui Cui^{a,b,*}, Li Jia^c, Wenjie Fan^{a,b}

^a Institute of RS and GIS, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, 100871, China

^b Beijing Key Laboratory of Spatial Information Integration & Its Applications, Beijing, 100871, China

^c State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China

【概述】

本研究利用灌区干湿边普遍存在的现实，采用TSVI遥感蒸散发模型和改进型粒子群优化算法，优化获取SW气象蒸散发模型的动态土壤阻抗和植被冠层阻抗，提出了遥感气象蒸散发耦合模型（以下简称：SW_TVI）。以我国西北地区黑河流域中部灌区的4年站点实测日蒸散数据为基准，本研究估算的日蒸散发相关系数R全年为0.94，生长季为0.82，均方根误差RMSE全年为0.69 mm/d，生长季为0.95 mm/d。SW_TVI模型展现出三大主要特点：1、高质量组分分离，高精度估算逐日的土壤蒸发和植被蒸腾；2、模型稳定性强，对绝大部分经验参数和输入数据误差不敏感；3、普适性强，无需地面观测数据辅助和人工干预。

【研究区与数据】

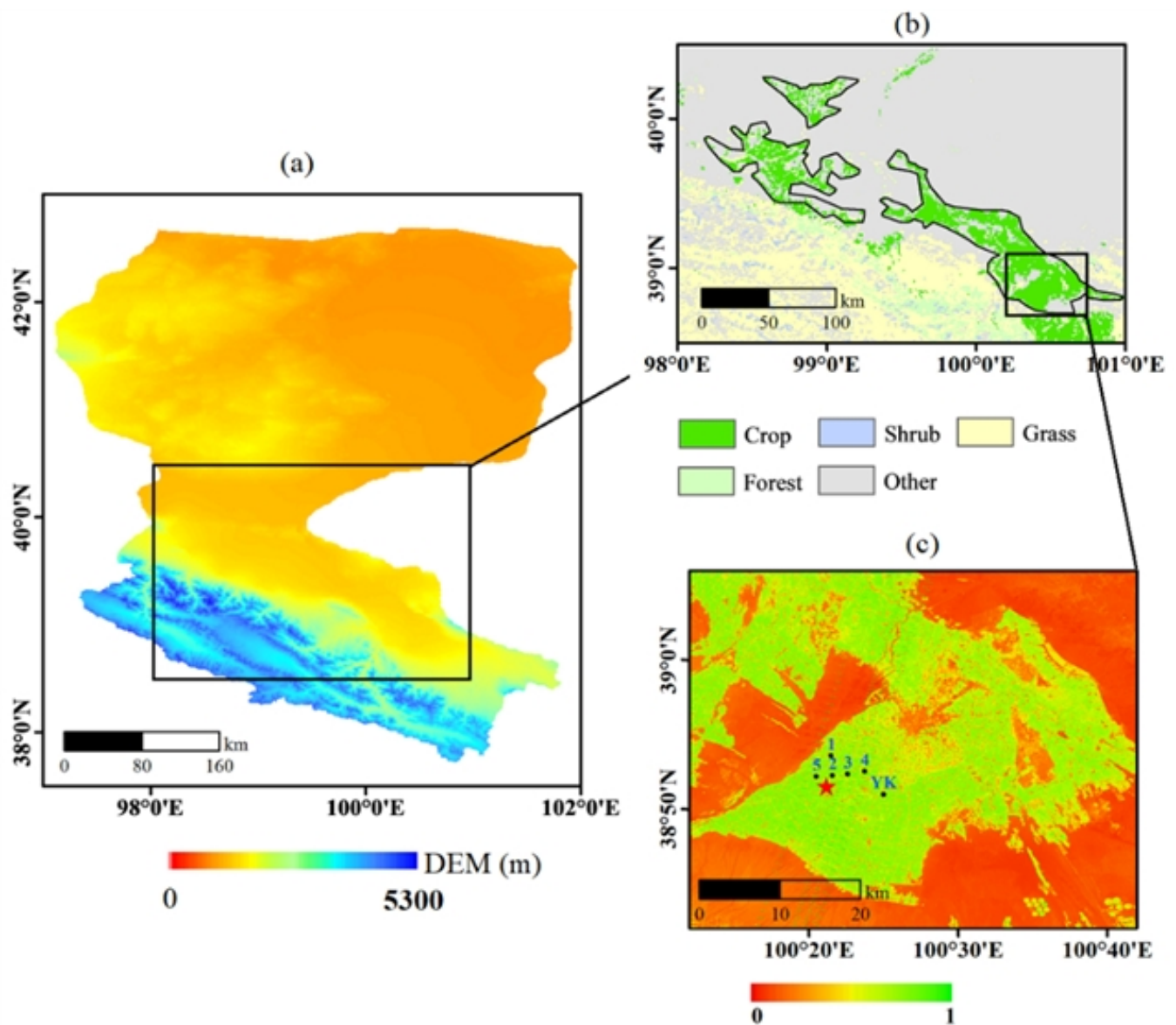


图1 我国黑河流域中部三大绿洲区分布及用于结果验证的6个涡动观测塔站

研究区为我国第二大内陆河-黑河流域中部三个面积较大的人工绿洲区，如图1所示。所种植作物以单季玉米为主，年降水量约200 mm，每年约有5次灌溉，主要灌溉水来源于黑河，导致该地区实际蒸散发量远大于降水量，灌溉用水是流域水资源重要支出项。

本研究所用数据包括：（1）遥感数据：MODIS 归一化植被指数NDVI, 叶面积指数LAI, 地表温度LST, GLASS 地表反照率Albedo，欧空局CCI表层土壤湿度，GLEAM根区土壤湿度；（2）气象数据：中国区域地面气象要素驱动数据集CMFD包括风速、气温、空气湿度、气压、降水、向下短波和长波辐射；（3）其它数据：地表分类产品和中国土壤水力参数数据库数据。

地面验证数据包括2009-2012年黑河流域观测计划获取的盈科农田站1套2009-2011年长序列蒸散发观测数据；5套2012年农作物生长季蒸散发观测数据；大满农田站1套2012年生长季同位素观测土

壤蒸发-植被蒸腾分离数据。

【研究方法】

SW双源蒸散发模型是一个物理机制明确的蒸散发概念模型，经阻抗参数化以后，具备很强的土壤蒸发-植被蒸腾模拟能力。由于经验参数众多、不合理取值、输入数据误差等因素，通常会导致模型具有很大的不确定性。秉承模型非校正不能有效使用的理念，由于土壤阻抗、植被冠层阻抗在整个模型中具有主导地位，校正各种经验参数和输入数据误差对土壤阻抗和植被冠层阻抗的影响即可在很大程度上实现模型的校正。本研究采用智能优化算法通过TSVI遥感蒸散发模型估算的晴空日日蒸散发校正SW气象蒸散发模型两套阻抗关键参数，实现遥感气象蒸散发模型耦合，以适应复杂多变的环境和种类繁多的输入数据。

输入数据的时空连续性处理：归一化植被指数NDVI和叶面积指数LAI数据采用谐波分析法Hants处理，表层土壤湿度采用基于参考数据的时空分辨率提升算法处理，根区土壤湿度经插值采样处理，气象数据根据高程梯度关系通过尺度回归系数反推实现空间降尺度。除地表温度LST外的所有数据经坐标变换、时空插补、尺度转换统一为 0.01° 空间分辨率，时间分辨率为1天。

遥感气象蒸散发耦合模型主要包括三个主要过程（图2）：（1）高质量晴空日日蒸散发估算：采用TSVI温度植被指数遥感蒸散发模型获取瞬时蒸发比，通过假定蒸发比不变获取晴空日日蒸散发。本步骤，设定了非降雨日，云遮挡率小于10%等限制条件，保证获取高质量的晴空日日蒸散发；（2）动态土壤阻抗-植被冠层阻抗的变换系数优化：假定SW气象蒸散发模型中估算的土壤阻抗和植被冠层阻抗与真实阻抗间存在线性关系，形成土壤阻抗变换斜率和截距、植被冠层阻抗变换斜率和截距共四个待优化参数，设定粒子群中的粒子拥有四维特征表征四个待优化参数，以SW气象蒸散发模型与TSVI遥感蒸散发模型模拟的总蒸散发差值最小为优化目标，通过粒子群游走收敛获取最优解，本研究采用了改进型的粒子群算法能有效获取全局最优解；（3）遥感气象蒸散发模型耦合：优化算法获取的阻抗变换系数表征在现有先验参数、数据来源和质量情况下，在特定的时空尺度框架内土壤阻抗和植被冠层阻抗的最优动态表达，将其带入SW气象蒸散发模型用于蒸散发组分分离计算，完成遥感气象蒸散发模型耦合。

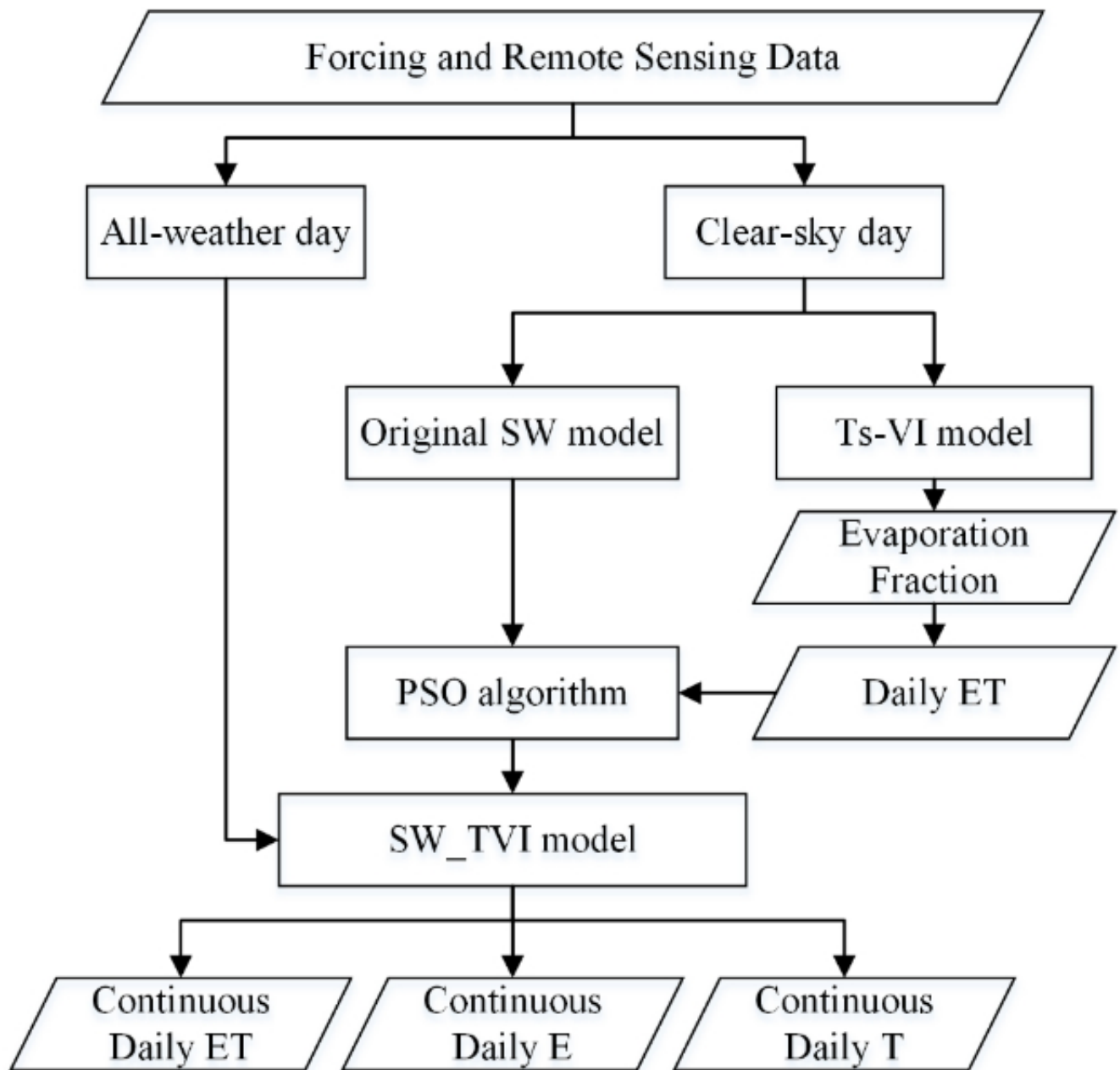


图2 遥感气象蒸散发耦合模型技术路线

【研究结果与主要结论】

? 总蒸散发验证

基于盈科（YK）站2009-2011年涡动观测数据，对TSVI遥感蒸散发模型、SW气象蒸散发模型、SW_TVI遥感气象蒸散发耦合模型估算的总蒸散发进行了综合对比分析。

结果表明（表1，图3）：经过质量控制的TSVI遥感蒸散发模型能很好地估算晴空日日蒸散发（ $R=0.91$ ， $RMSE=0.83\text{ mm/d}$ ）；SW_TVI遥感气象蒸散发耦合模型和TSVI遥感蒸散发模型在晴空日具有非常好的时空一致性，表明粒子群优化算法在参数解算中具有可靠性；SW_TVI遥感气象蒸散发耦合模型和实际观测数据一致性高（ $R=0.94$ ， $RMSE=0.69\text{ mm/d}$ ），且显著降低了原始SW气象蒸散发模型的不确定性和低估的情况（ $RMSE$ 降低37.3%， $Bias$ 由 -0.69 mm/d 趋近于0）。

表1 TSVI、SW和SW_TVI模型在盈科站的表现（2009-2011）

Error metrics of ET estimates from SW_TVI and Ts-VI models against *in situ* measurements at the YK station during 2009-2011, including R (correlation coefficient), RMSE (root mean square error), Bias (mean Bias), and MAD (mean absolute deviation). N is the number of samples.

	R	RMSE mm d^{-1}	Bias mm d^{-1}	MAD mm d^{-1}	N
Ts_VI vs observed	0.91	0.83	-0.21	0.63	149
SW_TVI vs. Ts_VI	0.94	0.86	0.58	0.73	178
SW_TVI vs observed	0.94	0.69	0.02	0.51	774

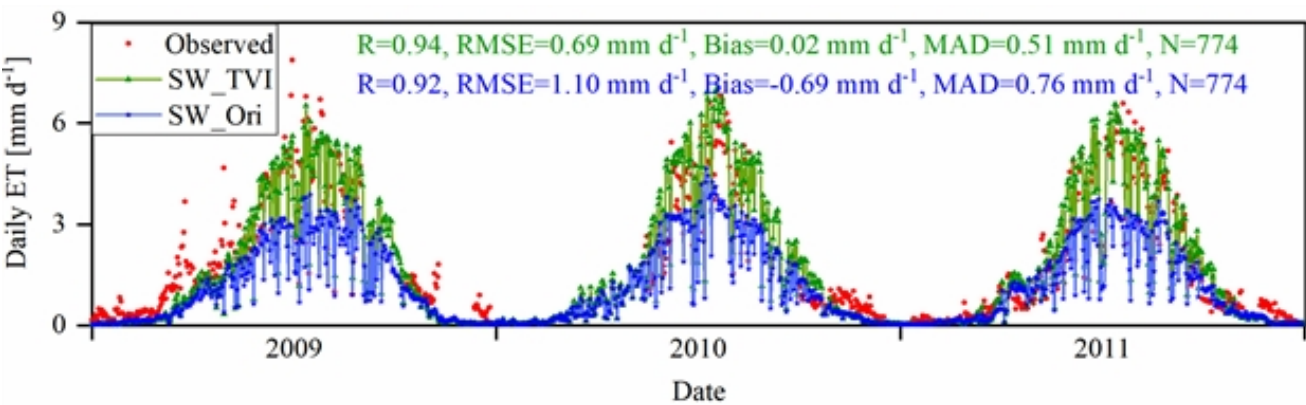


图3 盈科站2009-2011年SW_TVI模型与SW模型的对比

另一方面，在生长季，利用2012年5套涡动观测台站数据进行了生长季模型验证，与原始SW气象蒸散发模型相比SW_TVI遥感气象蒸散发模型的 $RMSE$ 降低了55.2%，精度达到0.69

mm/d,表明SW_TVIV遥感气象蒸散发耦合模型在生长季具有很好的蒸散发模拟能力。

? 蒸散发组分分离验证

采用大满站同位素观测的植被蒸腾与总蒸散发的比值（T/ET），对SW_TVIV遥感气象蒸散发耦合模型的土壤蒸发-植被蒸腾分离能力进行了验证，同时作为对比，原始SW气象蒸散发模型也被用来做了比较。

结果表明（图4）：SW_TVIV遥感气象蒸散发耦合模拟的T/ET比值仅比观测值低估5.5%，显著优于原始SW气象蒸散发模型的-22.3%，表明生长季SW_TVIV遥感气象蒸散发耦合模型可以很好地实现蒸散发的组分分离。

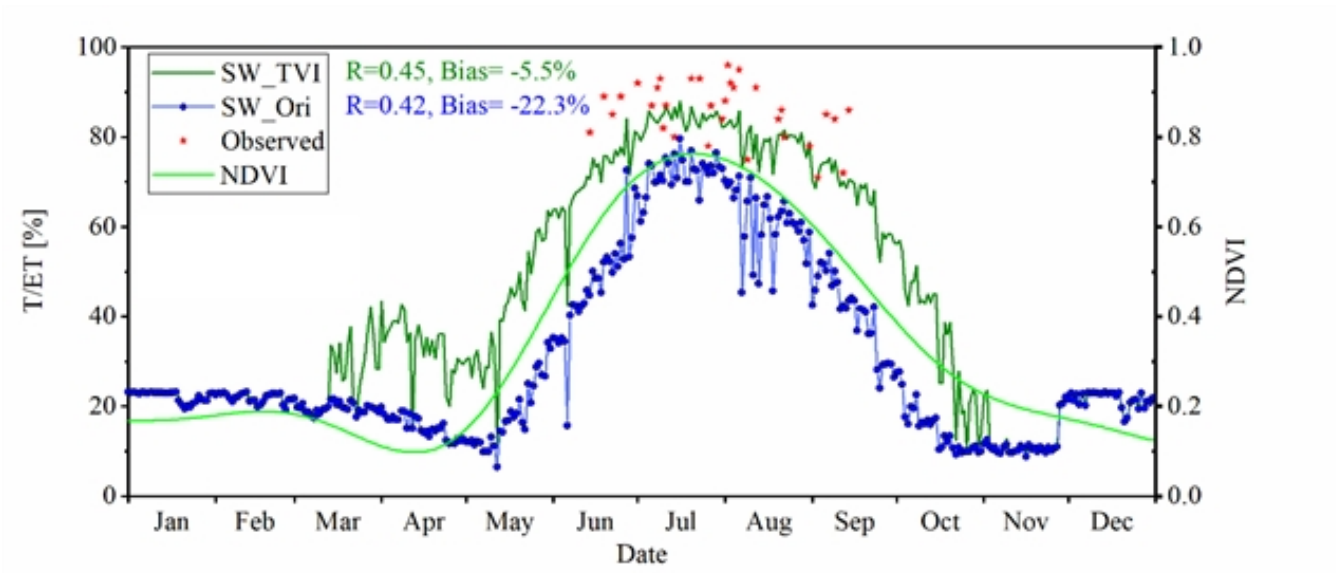


图4 SW_TVIV与SW模型估算的植被蒸腾与总蒸散发（T/ET）比值验证结果

? 基于长时间序列地面观测的模型稳定性分析

植被冠层阻抗对SW气象蒸散发模型表现具有重要影响，此部分选取植被冠层阻抗参数化方案中的7个经验参数（争议较大的是植被冠层最小阻抗和有效叶面积指数），根据文献或任意改变某个值，将SW_TVIV遥感气象蒸散发耦合模型、SW气象蒸散发模型结果和盈科站2009-2011年的真实观测结果做对比。

结果表明（表2）：经验参数的改变对SW_TVIV遥感气象蒸散发耦合模型影响非常微弱（RMSE变动小于0.1mm/d,介于0.69 mm/d-0.76 mm/d之间），但对SW气象蒸散发模型影响较大（RMSE变动大于0.6 mm/d，介于0.76 mm/d 到1.39 mm/d 之间），表明SW_TVIV遥感气象蒸散发耦合模型具有高鲁棒性和较强稳定性。

表2 SW_TVI模型和SW模型经验参数敏感性分析

Overall comparison of SW_TVI and SW_Ori models under different parameters value against the in situ measurements at YK station. Ref: reference of the changed parameters. The bold variable is the changed parameter. "-" means that the value of this study was used. Results were shown as SW_TVI vs. SW_Ori for R, RMSE (mm d⁻¹) and Bias (mm d⁻¹). $R_{a,min}$: s m⁻², K_{D_0} : kPa⁻¹, K_{D_2} : w m⁻², T_{opt} : °C, θ_{cr} : cm³ cm⁻³, θ_{wilt} : cm³ cm⁻³. "Benchmark" is the scheme used in this study.

Scheme	$R_{a,min}$	K_{D_0}	K_{D_2}	T_{opt}	$(\theta_{cr}, \theta_{wilt})$	LAI_{eff}	R	RMSE	Bias	Ref
Benchmark	70	0.238	500	25	(0.1,0.3)	LAI	0.94 vs. 0.92	0.68 vs. 1.10	0.02 vs. -0.69	This study
S-1	40	-	-	-	-	$(0.3LAI + 1.2)$	0.94 vs. 0.93	0.68 vs. 0.76	0.03 vs. -0.36	(Bougeault et al., 1991)
S-2	60	-	-	-	-	-	0.94 vs. 0.92	0.69 vs. 1.00	0.03 vs. -0.61	(Alapaty et al., 1997)
S-3	100	-	-	-	-	-	0.94 vs. 0.91	0.69 vs. 1.30	0.03 vs. -0.84	(Allen et al., 2006)
S-4	-	0.02	-	-	-	-	0.94 vs. 0.93	0.69 vs. 0.76	-0.05 vs. -0.38	(Zhu et al., 2014)
S-5	-	-	200	-	-	-	0.94 vs. 0.93	0.69 vs. 0.76	0.05 vs. -0.35	Arbitrary
S-6	-	-	-	20	-	-	0.94 vs. 0.91	0.7 vs. 1.12	0.04 vs. -0.69	Arbitrary
S-7	-	-	-	-	(0.11,0.4)	-	0.94 vs. 0.90	0.70 vs. 1.39	0.06 vs. -0.90	Arbitrary
S-8	-	-	-	-	-	LAI	0.95 vs. 0.92	0.74 vs. 1.25	0.08 vs. -0.82	(Noilhan and Planton, 1989)
S-9	-	-	-	-	-	0.5LAI	0.95 vs. 0.93	0.76 vs. 1.07	0.12 vs. -0.69	(Allen et al., 2006)

? 经验参数和输入数据误差敏感性分析

选取15个关键经验参数和输入数据，以2009年生长季全灌区模拟结果为基准，对任意经验参数或输入数据叠加+10%或-10%误差，采用叠加误差导致的蒸散发模拟差值与基准值的比，作为参数敏感性的度量。

结果表明（表3）：除跟净辐射计算相关的反照率和气温有一定敏感性以外，SW_TVI遥感气象蒸散发耦合模型对另外13个变量（和输入数据）均不敏感，敏感度小于2.5%（20%误差情况下）。

表3 经验参数和输入数据敏感性分析结果

Sensitivity of the SW_TVI model to input variables and empirical parameters with $\pm 10\%$ range of variation from their reference values used in this study.

Variables/Parameters		Unit	S_p	Rank
Input variable	NDVI	–	0.015	7
	LAI	$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$	0.007	12
	Albedo	–	0.103	2
	Surface soil moisture	cm^3	0.013	8
		cm^{-3}		
	Root zone soil moisture	cm^3	0.008	11
		cm^{-3}		
	Air Temperature	$^{\circ}\text{C}$	0.168	1
	Air Pressure	kPa	0.019	6
	Specific Humidity	g g^{-1}	0.009	10
Empirical parameter	Wind Speed	m s^{-1}	0.021	5
	$r_{s,\min}$	s m^{-1}	0.001	13
	K_{Rs}	W m^{-2}	0.001	14
	T_{opt}	$^{\circ}\text{C}$	0.024	4
	K_{D_0}	kPa^{-1}	0.025	3
	soil resistance parameter (b1)	-	0.001	15
	soil resistance parameter (b2)	-	0.012	9

【总结】

本研究通过晴空日TSVI遥感蒸散发模型估算的总蒸散发，采用改进型粒子群智能优化算法，优化SW气象蒸散发模型关键参数-土壤阻抗和植被冠层阻抗，提出了土壤蒸发-植被蒸腾分离的遥感气象蒸散发耦合模型（SW_TVI），在我国第二大内陆河流域中部灌区开展了验证及评估工作。该模型在能量平衡部分耦合研究者前期自主研发的区域尺度植被降雨截留遥感模型RS-Gash，实际上实现了土壤蒸发-植被蒸腾-降雨截留蒸散发三组分的有效分离。组分分离的蒸散发将对定量化作物灌溉用水、干旱监测、作物估产等具有重要参考价值。有潜力满足我国华北等北方地区水资源短缺、地下水保护等重大需求。

【未来研究计划】

后期将继续依托研发的遥感气象蒸散发耦合模型SW_TVI，生产华北地区过去二十年时空连续、

逐日、组分分离的蒸散发全要素科学数据集（土壤蒸发、植被蒸腾、植被降雨截留），支撑华北地区水资源管理和高效利用、地下水资源保护等国家重大需求。同时，将结合前期技术积累，突破高分辨率限制，实现亩级尺度（30

m）组分分离蒸散发全要素估算，支撑精细化水资源高效利用、作物估产等广泛的应用需求。

本研究得到国家自然科学基金土壤-植被系统蒸散发多模型集成研究(41901348)、国家重点研发计划国际合作项目粮食作物重大病虫害遥感监测预警与防控技术(2017YFE0122400)等项目的支持。感谢国家青藏高原科学数据中心、中国科学院、清华大学、北京师范大学、北京工业大学、北京大学等单位，为研究提供输入数据和结果验证数据等多方面的支持。

文献引用：Cui, Y., Jia, L., Fan, W. (2021). Estimation of actual evapotranspiration and its components in an irrigated area by integrating the Shuttleworth-Wallace and surface temperature-vegetation index schemes using the particle swarm optimization algorithm. *Agricultural And Forest Meteorology*, 307, 108488

原文地址：<https://s.elsevier.com/a/1dB38cFXJZ1Zo>（2021年7月24日前免费）

【作者介绍】



崔要奎：男，博士，北京大学地空学院遥感所教师、所长助理。本科毕业于武汉大学遥感学院，先后在北京大学、中科院遥感地球所获硕士和博士学位，清华大学水利系博士后，荷兰瓦赫宁根大学学术访问。

主要研究领域为蒸散发遥感，在定量遥感、水循环遥感、遥感大数据与人工智能等领域，特别是在遥感气象蒸散发耦合模型，定量遥感与人工智能模型耦合，跨尺度多分辨率土壤湿度产品质量改善及其在农业水文中的应用等方面做出了一系列原创性贡献，发布了多套科学数据集。主持/参与国家自然科学基金、科技部重点研发等20多项科技项目。发表学术论文50篇（第一/通讯作者24篇），主要包括Journal of Hydrology、Agricultural and Forest Meteorology、《自然集团》期刊Scientific Data、IEEE期刊、遥感学报等主流专业期刊，编写专著2部；在国内国际重要学术会议上做特邀报告、大会发言、成果展示共30多次；担任Frontiers in Remote Sensing等多个国际SCI/国内核心期刊以及专刊的编委、特邀主编；IEEE TGRS、AFM、JOH等多个主流专业期刊审稿人；授权/申请国家发明专利7项；第一届全球变化水循环遥感青年论坛会议召集人；第一届中国陆面蒸散发研究大会专题召集人；中国测绘学会摄影测量与遥感专业委员会委员；获同行评议奖及院校级奖励多项。

作者：崔要奎等 来源：《农业与森林气象学》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发