

遥感反演土壤水分指数的适用性研究

刘子琪, 郑杰, 朱忠礼*, 曲裕泉, 徐自为

北京师范大学地理科学学部, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京

收稿日期: 2022年5月27日; 录用日期: 2022年6月23日; 发布日期: 2022年6月30日

摘要

土壤水分是地表过程的核心变量之一, 实时准确掌握土壤水分的空间分布信息有利于水资源管理、洪水预测以及全球气候变化研究, 且对于农业发展及灌溉等都具有重要的意义。遥感反演土壤水分指数发展十分迅速, 但对于不同指数的适用性还缺乏定量的认识。本文利用2012至2014年那曲地区MODIS数据计算多种遥感反演土壤水分指数, 并与地面观测数据进行相关性分析, 结果表明: 在非冻融时期, ATI、SEE以及TVDI与土壤水分相关性较好, 从相关系数来看, 在不考虑植被覆盖条件和低植被覆盖条件下与土壤水分相关性较好的指数依次是ATI、SEE和TVDI; 而在高植被覆盖条件下与土壤水分相关性较好的指数依次是SEE、TVDI、SWCTI和ATI; 同时本文认为综合使用多种指数是实现土壤水分监测一种有效的途径, 在不考虑植被覆盖和低植被覆盖条件下综合使用ATI、SEE组合, 在高植被覆盖条件下综合使用SEE、ATI、NDVI组合可以更有效地监测土壤水分的时空分布。

关键词

土壤水分, 遥感反演指数, 适用性研究, 青藏高原

Applicability Research of Parameters in Soil Moisture Inversion

Ziqi Liu, Jie Zheng, Zhongli Zhu*, Yuquan Qu, Ziwei Xu

State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing

Received: May 27th, 2022; accepted: Jun. 23rd, 2022; published: Jun. 30th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 刘子琪, 郑杰, 朱忠礼, 曲裕泉, 徐自为. 遥感反演土壤水分指数的适用性研究[J]. 地理科学研究, 2022, 11(3): 395-406. DOI: 10.12677/gser.2022.113039

Abstract

Soil moisture is one of the core variables of the surface process, and accurately grasping the spatial distribution information of soil moisture in real time is not only beneficial to water resources management, flood forecasting and global climate change, but also can be important for agricultural development and irrigation management. At present research, remote sensing parameters for retrieving soil moisture have been well developed, however, the applicability of different parameters has not yet been quantitatively recognized. In this paper, the MODIS data from Naqu area are used to calculate a variety of remote sensing soil water parameters, and carry out the correlation analysis with ground observation data, the result shows that ATI, SEE and TVDI are well correlated with soil moisture during non-freezing period. From the correlation coefficient, the parameters related to soil moisture under arbitrary vegetation and low vegetation cover conditions are ATI, SEE and TVDI. The parameters related to soil moisture under high vegetation cover conditions are SEE, TVDI, SWCTI and ATI. At the same time, this paper believes that the comprehensive use of multiple parameters is an effective way to achieve soil moisture. Under the condition of not considering vegetation and low vegetation cover, the combination of ATI and SEE can be used, and under the condition of high vegetation coverage, the combination of SEE, ATI and NDVI can be used.

Keywords

Soil Moisture, Parameters of Soil Moisture Inversion, Applicability Research, Qinghai-Tibet Plateau

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤水分作为联系地表和大气之间物质和能量交换的重要纽带,是水文模型、气候模型、生态模型和地表过程模型的关键输入参数,在水资源管理、洪水预测和天气预报等方面发挥着重要作用[1]。目前,用于监测土壤水分的方法主要有地面测量法和遥感反演法,地面测量方法包括烘干称重法、中子仪法、时域反射仪法、频域反射仪法、宇宙射线法等,虽然可以较精确地进行监测,但土壤水分动态监测的空间范围受限[2][3]。与传统监测手段相比,利用遥感技术进行土壤水分反演具有高时效性、高空间分辨率及经济高效等优势,为实现大面积土壤水分的动态监测提供了可能[4]。

现有遥感反演土壤水分的方法主要基于可见光、近红外、短波近红外、热红外以及微波波段,其中微波方法被认为是目前最有效的一种土壤水分反演方法[5][6]。光学遥感主要利用土壤表面光谱反射特性、发射率、地表温度对土壤水分进行估算[7]。微波遥感方法又分为主动微波和被动微波方法,被动微波具有时间分辨率较高、对土壤水分敏感的优势,但同时存在着空间分辨率较低(20~50 km)的问题。而主动微波具有较高的空间分辨率,对地表粗糙度等较为敏感,但其时间分辨率(16~25天)又较低,因此目前更多研究利用空间和时间分辨率都相对较高的可见光、近红外以及热红外波段来获取地表土壤水分信息[8]。

通过光学遥感进行土壤水分反演主要分为基于指数和土壤热惯量的方法[7]。指数方法利用卫星数据建立不同的遥感模型,定量的对土壤水分分布进行获取和评估[9]。Qiu等[10]利用归一化多波段指数(NMDI)对玉米这一农作为不同生长阶段地表信息进行了获取,发现在不同植被覆盖条件下NMDI反映的

土壤水分和植被水含量有所差异。土壤热惯量法则是通过实验将土壤水分含量与土壤热特性指数建立统计关系,借助能量平衡将遥感卫星数据与热惯量相连接[11]。杨树聪等[12]开展了不同土壤覆被下改进的表观热惯量模型与土壤水分进行相关性分析,发现低植被覆盖下表观热惯量的反演效果更好。

近年来,许多学者利用遥感光谱信息进行土壤水分指数的原理和算法研究,为更加精确的借助遥感数据获取土壤水分信息。例如 Watson 等[13]提出通过热红外波段获取地表温度日变化幅度与热模型结合来估测土壤水分; Sandholt 等[14]研究发现 LST/NDVI 特征空间中存在土壤水分等值线,并基于此提出反映区域干、湿状况的温度植被干旱指数(TVDI); Fensholt 等[15]考虑到叶片水分在短波红外波段具有较高的吸收率提出了短波红外水分胁迫指数(SIWSI); Yao 等[16]基于 MODIS 第 6、7 波段提出了短波红外土壤水分指数(SIMI)等。而各指数原理和适用性的差别使得对各指数进行比较与优选成为科研工作者的研究目标之一。赵泽斌等[17]基于 SiB2 模型比较了表观热惯量、蒸发比、实际蒸发比等参数与土壤水分的相关性,结果表明实际蒸发比与植被根区土壤水分的相关性最好,更能反映根区土壤水分的变化动态;杨永民等[18]比较了热红外遥感的四种土壤水分估算方法,发现温度植被干旱指数(TVDI)误差较大,而基于蒸散比/潜在蒸散比的方法会在一定程度上改善 TVDI 进行估算时产生的误差; Ghulam 等[19]通过研究证明了改进垂直植被指数(MPDI)能较好反映研究区旱情动态变化,而且在高植被覆盖区,MPDI 的干旱监测效果明显优于垂直植被指数(PDI); Zhao 等[20]利用温度植被干旱指数(TVDI)和定量温度植被指数(TVQI)对北京市土壤水分进行了获取和预测,发现 TVDI 在不同季节交换数值变化较大,TVQI 则在月尺度上对降水更为敏感。

土壤水分相关指数的研究主要对同类型的指数进行对比分析,目前现有研究中对于综合利用多种指数实现土壤水分监测的适用情况没有一个定量的认识,因此本文以青藏高原那曲地区为研究区域,对多种土壤水分相关指数进行了分类和对比研究,对其适用性进行了探讨分析。青藏高原作为地球第三极,也是亚洲水塔,探讨青藏高原土壤水变化对于研究青藏高原热力学特征变化及其对东亚乃至全球变化的影响具有重要意义。本研究通过对现有的多种遥感反演土壤水分指数进行计算和对比分析,探讨各指数与土壤水分的相关程度,确定各指数在研究区的适用性,为青藏高原高精度土壤水分信息的获取和土壤水分监测相关研究提供参考。

2. 数据来源与处理

2.1. 研究区和地面观测数据

那曲市地处西藏北部,位于青藏高原腹地,属于典型的高寒气候。年平均气温为 -0.9°C 至 -3.3°C ,年相对湿度为 48%至 51%。青藏高原内部年降水量为 400~500 mm,其中绝大多数降水出现在 6 月至 8 月的季风期,为主要植被生长期。那曲市的自然资源十分丰富,但总体农业、经济等领域的发展速度和发展质量仍需提高。目前那曲地区的遥感土壤水分产品存在着精度及空间分辨率普遍偏低的情况,难以满足该地区中小尺度研究的需求,因此需要进行更高精度、高空间分辨率的卫星遥感产品研究。Yang 等[21]在该区域建立了一个密集的观测网络来监测土壤水分和土壤温度的变化。观测网络的平均海拔为 4500 m,而区域内部起伏较少相对平坦。研究区内地表主要覆盖类型为高寒草地(93.46%),生物量较低。区域内土壤质地空间异质性较大,主要为粉土和沙土,同时包含少量粘土,土壤表面的有机碳含量较高。观测网络包含三个尺度上的嵌套网络(1.0° 、 0.3° 、 0.1°),每个网络节点包括四层观测(0~5、10、20 和 40 cm)。土壤水分传感器网络数据目前已在青藏高原科学数据中心(<http://www.tpdatabase.cn/>)发布,在本文中使用的 2012~2014 年度非冻融时期(4 月至 10 月)中尺度网络 0~5 cm 的土壤水分观测数据(27 个节点),具体分布如图 1 所示。

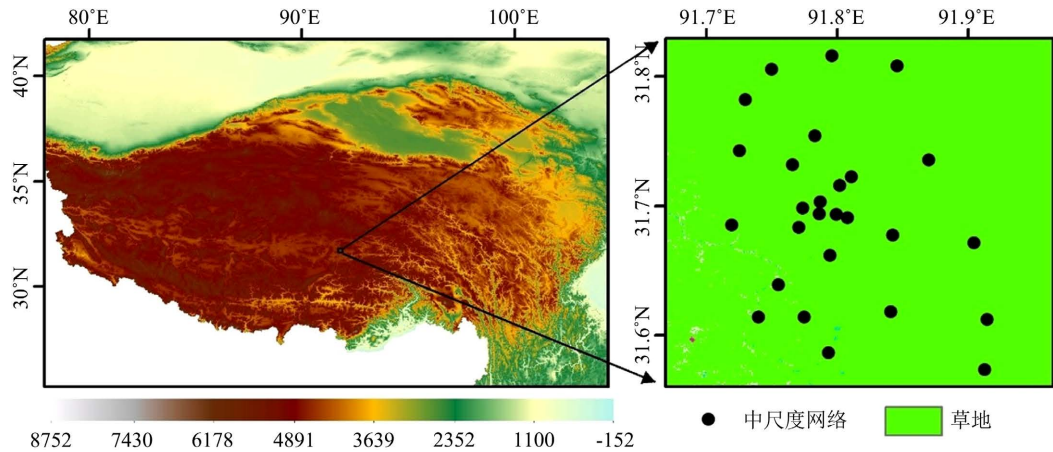


Figure 1. The DEM map of research area and the location of soil moisture wireless sensor network
图 1. 研究区概况及土壤水分无线传感器网络分布示意图

2.2. 遥感数据

本文主要利用 2012~2014 年获取的 MODIS 地表反射率产品(MOD09GA)、地表温度产品(MOD11A1、MYD11A1)以及反照率产品(MCD43A3)来计算反演土壤水分指数。为了保证遥感数据质量, 在研究中利用质量控制数据剔除了研究区内受云和气溶胶影响的像元, 质量控制标准如表 1 所示。对于 MOD09GA 数据, 如果质量控制数据中位于 0~1、2、6~7、8~9、12、13 位的值分别为 00、0、01、00、0、0, 则保留像元, 否则删除像元; 同样的, 对于 MOD11A1、MYD11A1 以及 MCD43A3 也利用质量控制数据删除不满足要求的像元。

Table 1. Qualification control standard
表 1. 质量控制标准

MODIS 产品	位	参数名称	值	描述
MOD09GA	0~1	Cloud state	00	Clear (no cloud)
	2	Cloud shadow	0	No cloud shadow
	6~7	Aerosol quantity	01	Low aerosol content
	8~9	Cirrus detected	00	No cirrus
	12	MOD35 snow/ice flag	0	No snow/ice
	13	Pixel is adjacent to cloud	0	Pixel is not adjacent to cloud
MOD11A1 MYD11A1	0~1	Mandatory QA flags	00	LST produced, good quality, not necessary to examine more detailed QA
MCD43A3	0	Mandatory QA flags	0/1	0 = processed, good quality (full BRDF inversions) 1 = processed, see other QA (magnitude BRDF inversions)

3. 土壤水分指数及评价指标

3.1. 土壤水分相关指数及其计算方法

土壤水分作为地表水和地下水间的纽带, 是研究地表能量交换的基本要素, 其自身的变化能够影响

地表指数产生改变, 如地表反射率、植被生长状况等。光学遥感反演土壤水分可分为可见光-红外方法和热红外法两种。可见光-近红外方法主要依赖于土壤和植被的反射光谱特性, 借助遥感数据通过数值计算直接获取与地表土壤水分信息相关的各种指数, 是使用遥感进行土壤水分和旱情监测的一种直接有效的方法。相关指数又根据其计算原理可分为植被指数法、植被-温度指数法和湿度指数法[22]。而热红外遥感法主要基于地表发射率和温度对土壤水分进行研究, 其中热惯量作为决定地物日温差大小的物理量被广泛研究[23]。本文主要基于可见光-红外方法和热红外法选取了 13 种土壤水分指数进行分类研究, 具体指数分类及计算方法如表 2 所示:

Table 2. Classification and methods of remote sensing soil moisture index
表 2. 遥感反演土壤水分指数分类与方法

指数分类	方法	全称	计算公式	特点	参考文献
植被指数法	PDI	垂直植被指数 Perpendicular Drought Index	$\frac{1}{\sqrt{M^2+1}}(R_{red} + MR_{nir})$	通过不同遥感指数间接估算土壤水分, 与植被长势等有较强的关联, 但易忽略云、大气等环境因素影响, 具有一定时间滞后性。	[24]
	MPDI	改进垂直植被指数 Modified Perpendicular Drought Index	$\frac{R_{red} + MR_{nir} - f_v(R_{v,red} + MR_{v,nir})}{(1-f_v)\sqrt{M^2+1}}$		[19]
植被-温度指数法	TVDI	温度植被干旱指数 Temperature Vegetation Dryness Index	$\frac{T_s - T_{smin}}{T_{smax} - T_{smin}}$	利用植被冠层温度的变化与植物受水分胁迫直接相关, 而土地表面温度与植被指数具有互补特性。在范围较大及气候、土壤状态处于相对不变的区域较为适用。本方法具有一定的区域和时间局限性。	[14] [25]
	VSWI	植被供水指数 Vegetation Supplication Water Index	$\frac{NDVI}{LST}$		[26]
	VTCI	条件植被温度指数 Vegetation Temperature Condition Index	$\frac{T_{smax} - T_s}{T_{smax} - T_{smin}}$		[27]
	SEE	土壤蒸发效率 Soil Evaporative Efficiency	$\frac{T_{smax} - T_{sHR}}{T_{smax} - T_{smin}}$		[28]
	SWCTI	土壤水分含量温度指数 Surface Water Content Temperature Index	$\frac{SWCI}{LST - C}$		[29]
湿度指数法	SIMI	短波红外土壤水分指数 Shortwave Infrared Soil Moisture Index	$\frac{\sqrt{R_6^2 + R_7^2}}{\sqrt{2}}$	湿度相关指数适用的波段 6 和波段 7 可以有效削弱大气的干扰, 从而获取土壤和植被水分含量, 适用于农田生长期等土壤水分监测。但植被水分和土壤水分响应关系存在不一致性, 因此易产生误差。	[16]
	NMDI	归一化多波段干旱指数 Normalized Multi-band Drought Index	$\frac{R_2 - (R_6 - R_7)}{R_2 + (R_6 - R_7)}$		[30] [31] [32]
	SWCI	土壤含水量指数 Surface Water Capacity Index	$\frac{R_6 - R_7}{R_6 + R_7}$		[33]
	VSDI	短波红外干旱指数 Visible and Shortwave Infrared Drought Index	$1 - [(R_{swir} - R_{blue}) + (R_{red} - R_{blue})]$		[34]
	SIWSI	短波红外水分胁迫指数 Shortwave Infrared Water Stress Index	$\frac{R_6 - R_2}{R_6 + R_2}$		[15]

Continued

热惯量法	ATI	表观热惯量 Apparent Thermal Inertia	$C \frac{1-\alpha}{A}$	不同物质的热惯量差别较大，土壤热惯量与土壤含水量存在一定相关性。其中所需昼夜地表温度数据易受云等影响，数据获取存在一定困难。	[35]
------	-----	-----------------------------------	------------------------	--	------

各指数具体计算公式可参考对应代表性文献。

利用遥感数据通过表 2 中的公式分别计算出各土壤水分指数，建立各指数与土壤水分之间的关系并进行相关性分析。需要说明的是，研究中需要的是各指数与土壤水分之间稳定的经验关系，然而由于土壤水分的高时空异质性以及地面站点观测和遥感观测的尺度不匹配问题，导致单个站点的土壤水分观测值无法对应 MODIS 像元获得的土壤水分信息，也就是说直接利用地面点测量值与对应像元值来建立回归关系具有不确定性，本研究采用空间上求平均的方法来减小不确定性[36]，即将研究区内 27 个节点的平均土壤水分作为地面测量值。

3.2. 评价指标

指数的优选实际上就是对指数和土壤水分之间的回归关系进行评价，常用的指标包括决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)，RMSE 单位为 m^3/m^3 。其中决定系数反映的是指数与土壤水分之间的相关程度，决定系数越大，相关性越好，而均方根误差则反映了由回归关系得到的土壤水分估计值和地面观测值之间的偏差，值越小，表示回归误差越小。计算公式如下[37]：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i^n (SM_i^{reg} - SM_i^{obs})^2}{\sum_i^n (SM_i^{reg} - \overline{SM}^{obs})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (SM_i^{reg} - SM_i^{obs})^2}{n}} \quad (2)$$

其中 n 为选用数据的量， i 为数据的序号， SM_i^{reg} 为通过回归关系得到的土壤水分估计值， SM_i^{obs} 为地面观测值。

4. 分析与讨论

4.1. 单一指数分析

根据上文计算得到的遥感反演土壤水分指数，建立各指数与土壤水分之间的关系并进行相关性分析。由于研究区内非冻融期的主要植被覆盖类型为草地，植被生长种类较为均一，因此在研究中采用 NDVI 作为区分植被覆盖度的参考指标。根据吴黎等[38]的研究结果将研究区分为低植被覆盖 $0 < \text{NDVI} \leq 0.35$ 和高植被覆盖 $0.35 < \text{NDVI} \leq 1$ 两种情况，保留了 $0 < \text{NDVI} \leq 1$ ，即不考虑植被覆盖度的情况，同时根据各指数类型进行了排列，结果如表 3 所示：

从表 3 可以看出在四类指数中，热惯量法在不同植被覆盖条件下的相关性都比较好，植被 - 温度指数法的各指数的相关性总体要优于植被指数法和湿度指数法，而湿度指数法中各指数相关性的差别较大。植被 - 温度指数法相较于植被指数法和湿度指数法将温度和光谱反映的植被信息进行了综合计算，考虑

的影响量更为复杂, 因此相关性更强。在不考虑植被覆盖和低植被覆盖条件下总体与土壤水分的决定系数较高的指数依次是 ATI、SEE、TVDI; 而在高植被覆盖条件下与土壤水分的决定系数较高的指数依次是 SEE、TVDI、SWCTI 以及 ATI; 其中 ATI、SEE 以及 TVDI 在三种情况下与土壤水分之间都存在较好的相关性, 如图 2 所示。

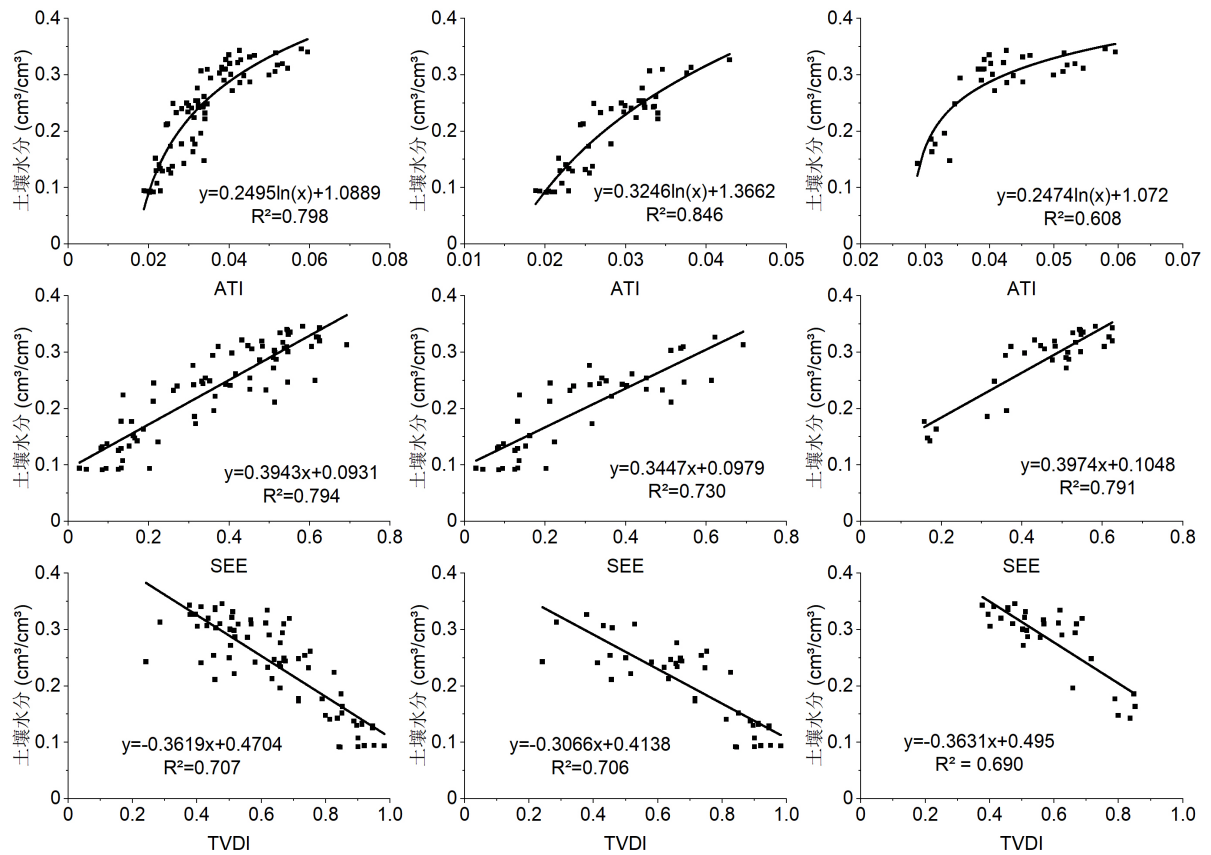
Table 3. Evaluation results between remote sensing soil moisture index and soil moisture

表 3. 遥感反演土壤水分指数与土壤水分评价结果

指数分类	指数	不考虑植被覆盖		低植被覆盖		高植被覆盖	
		R ²	RMSE (m ³ /m ³)	R ²	RMSE (m ³ /m ³)	R ²	RMSE (m ³ /m ³)
植被指数法	MPDI	0.389	0.062	0.323	0.060	0.254	0.052
	PDI	0.200	0.071	0.210	0.064	0.217	0.053
植被 - 温度 指数法	SEE	0.794	0.036	0.730	0.038	0.791	0.028
	TVDI	0.707	0.043	0.706	0.039	0.690	0.034
	SWCTI	0.460	0.059	0.084	0.069	0.651	0.036
	VSWI	0.404	0.061	0.540	0.049	0.011	0.060
	VTCI	0.346	0.064	0.460	0.053	0.192	0.054
	SIMI	0.496	0.057	0.358	0.058	0.234	0.053
湿度指数法	SWCI	0.470	0.058	0.406	0.056	0.166	0.055
	SIWSI	0.331	0.065	0.271	0.062	0.000	0.060
	NMDI	0.152	0.073	0.001	0.072	0.034	0.059
	VSDI	0.002	0.080	0.118	0.065	0.220	0.053
热惯量法	ATI	0.798	0.036	0.846	0.028	0.608	0.038

表观热惯量(ATI)作为描述土壤阻止其自身温度变化能力大小的指数, 与土壤水分之间存在较为密切的关系。从表 3 中可以看出, 在不考虑植被覆盖时, ATI 与土壤水分之间的相关性较好, R² 达到 0.798; 而根据 NDVI 区分植被覆盖条件后, 在低植被覆盖条件下 ATI 与土壤水分之间的关系达到最好, R² 达到 0.846, RMSE 为 0.028; 而在高植被覆盖条件下, 两者的相关性明显降低。这是由于高植被覆盖下卫星监测的温度为冠层温度, 受植被热量储存影响, 最高温度会降低、最低温度会升高, 使得日温差减小。植被长势覆盖度越高, 日温差减小的程度越大, 计算获取到的 ATI 数值出现误差, 因此在高植被覆盖度下相关性较低。

SEE 定义为实际土壤蒸发与潜在土壤蒸发的比值, 因为与土壤水分存在较好相关性而被广泛应用于土壤水分遥感产品的降尺度研究中。在 SEE 的计算过程中包含了地表温度、NDVI 等指数, 将地表蒸发信息与植被蒸腾进行了综合, 可以较为准确地反映土壤水分含量。从表 3 中可以看出 SEE 在三种条件下与土壤水分之间都存在较好的相关性, 尤其是在高植被覆盖条件下 SEE 与土壤水分的相关性最好, R² 达到 0.791, RMSE 达到最小值 0.028, 这主要是因为地表蒸散发受土壤含水量影响较大, 使得 SEE 与土壤水分之间存在较好的相关性。



注：从左至右依次为：不考虑、低、高植被覆盖

Figure 2. The scatter diagram between ATI, SEE, and TVDI and soil moisture

图 2. ATI、SEE、TVDI 与土壤水分关系散点图

TVDI 同样作为基于 NDVI-LST 特征空间来监测土壤水分的方法，是目前光学遥感反演地表土壤水分研究中使用最多的方法之一。Cho 等[39]通过研究发现 TVDI 和地表土壤水分之间存在负线性关系，相关系数在-0.9~-0.7 之间，本文结果与之吻合。在不考虑植被或低植被覆盖条件 TVDI 与土壤水分之间的 R^2 都为 0.71，略低于 ATI 和 SEE，而在高植被覆盖条件下 R^2 为 0.69，仅低于 SEE，这说明可以通过建立 TVDI 与土壤水分之间的经验关系模型来间接估算地表土壤水分的含量。而从三种指数与土壤水分的散点图中可以看出相对于 ATI 和 SEE 两种指数，TVDI 的数据结果更加分散，因此在使用 TVDI 作为单一指数作为反演指数时可能会产生更大的误差。

植被 - 温度指数中，SWCTI 作为最新提出的用于监测土壤水分的指数，在高植被覆盖条件下与土壤水分之间也存在较好的相关性，但作为土壤水分的监测指数具有一定局限性；VSWI 和 VTCI 均在植被覆盖较低的情况下与土壤水分的相关性较高，不适用于高植被覆盖。而湿度指数法中 SIMI、SWCI、SIWSI 均为低植被覆盖下表现优于高植被覆盖，其中 NMDI 在本文中与土壤水分相关性最弱，原因可能是研究区的高寒草甸下垫面土壤水分含量大于 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ，Wang 等[30]的研究表明 NMDI 在监测干燥裸土($0.005\sim 0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$)的土壤水分状态时表现较好，且 NMDI 与土壤水分的相关性随着叶面积指数(LAI)和土壤水分的增高迅速降低，因此不适用于本研究；Zhang 等[34]的研究表明 VSDI 与分水指数(FWI)之间存在一定的相关性，在一定程度上可以反应土壤水分的空间分布差异，而 Schneider 等[40]的研究表明 FWI 与土壤体积含水量之间存在非线性关系，且只能反映 0.24 至 $0.36 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 之间的土壤水分变化，因此本文中 VSDI 与

土壤水分体积含水量的相关性也较弱；与 ATI、SEE、TVDI 对比发现，虽然许多指数也使用了对水敏感的短波红外波段，能够反映植被水分胁迫，但在这些指数的计算过程中并不包括对水分胁迫也敏感的热红外波段，由于缺少热红外波段信息参与计算，影响了这些指数在土壤水分监测中的应用[29] [41]；PDI、MPDI 在本文中表现也较差，可能是受波段和土壤线的影响，这两种指数都只利用了近红外波段，而没有采用对土壤水分更敏感的热红外等波段，且这两种指数认为土壤线是固定不变的，因此在范围较大的地区应用可能受到限制[42]。

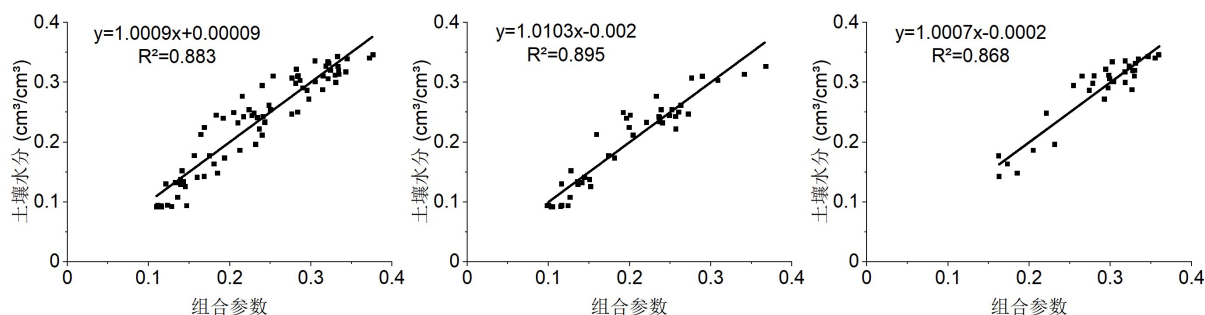
4.2. 指数组合分析

单一的遥感反演土壤水分指数通常只包含有限的土壤水分信息，本文希望通过综合利用多种遥感反演土壤水分指数进而提高地表土壤水分信息的监测效率。逐步回归分析是多元回归分析中的一种方法，其基本思想是逐个引入新变量，每引入一个新变量时考虑是否剔除已选变量，直至不再引入新变量，这种方法既保障了回归模型可以保留具有显著影响的变量，同时能够剔除不显著的变量，通常用于建立获取更加优化的回归模型，从而更加深入地研究各变量间的依赖关系[43]。本文利用逐步回归分析建立多种遥感反演土壤水分指数与土壤水分之间的关系，结果如表 4 所示：

Table 4. The result of stepwise regression

表 4. 逐步回归分析结果

植被覆盖度	回归模型	R ²	RMSE
不考虑植被覆盖	$0.023 + 0.254 \times \text{SEE} + 3.536 \times \text{ATI}$	0.883	0.028
低植被覆盖	$-0.065 + 7.77 \times \text{ATI} + 0.158 \times \text{SEE}$	0.895	0.024
高植被覆盖	$0.094 + 0.298 \times \text{SEE} + 2.803 \times \text{ATI} - 0.128 \times \text{NDVI}$	0.868	0.023



注：从左至右依次为：不考虑、低、高植被覆盖

Figure 3. The Relationship between combined indexes and soil moisture

图 3. 指数组合与土壤水分之间的关系

结合表 4 可知，在不考虑植被覆盖的条件下，单个指数与土壤水分相关性最高时 R² 为 0.798，RMSE 等于 0.036，而通过逐步回归分析法综合利用 ATI、SEE 两种指数，使得 R² 提高到 0.883，RMSE 减小到 0.028；而在低植被覆盖条件下，通过逐步回归分析法引入 SEE、ATI 两种指数使得 R² 由最高时的 0.85 提高到 0.895，RMSE 由最低时的 0.028 降低到 0.024；同样的，在高植被覆盖条件下，综合利用 SEE、ATI、NDVI 三种指数使得 R² 由最高时的 0.79 提高到 0.868，RMSE 由 0.028 降低到 0.023，使用指数组合预测结果如图 3 所示。由此可见，综合利用多种遥感反演土壤水分指数确实能够提高土壤水分的监测精度。

相关研究证明高覆盖的高寒草甸草地土壤具有较高的腐殖质和草皮结构,因此上层的土壤持水量较大[44],将 NDVI 纳入作为变量能够更加准确地对植被覆盖度进行描述,获取精度更高的土壤水分反演结果。

5. 结论

本文通过 MODIS 遥感数据分类计算了多种遥感反演土壤水分指数,并与实测土壤水分数据进行了相关性分析,结果发现:在不考虑植被覆盖条件下与土壤水分相关性较好的指数依次是 ATI、SEE、TVDI;而根据 NDVI 区分植被覆盖作为条件可以提高各指数与土壤水分的相关性。在不考虑植被覆盖条件和低植被覆盖条件下与土壤水分相关性较好的指数依次是 ATI、SEE、TVDI,而在高植被覆盖条件下与土壤水分相关性较好的指数依次是 SEE、TVDI、SWCTI 以及 ATI。

单一的遥感反演土壤水分指数通常只在某些条件下具有较为突出的优势,比如 ATI 在低植被覆盖条件下和土壤水分相关性较高,但高植被覆盖条件下 SEE 更为适用,因此在不同条件下选择使用多种指数构成综合的土壤水分反演模型将会是一种更为有效的途径。基于研究结果,本文认为在不考虑植被覆盖和低植被覆盖时使用 ATI、SEE 组合,在高植被覆盖时使用 SEE、ATI、NDVI 组合可以更有效的监测土壤水分的时空分布。而 NDVI 作为描述植被覆盖程度的指数,在描述高植被覆盖条件下的土壤水分含量时也可以纳入作为自变量之一。

本文的研究区位于青藏高原中部高寒草地,区域内地表情况较为均一,因此未对土壤类型、植被类型等进行差异分析并进行针对性研究。将研究范围进行扩大时,地表土壤和植被的差异性可能会对结果产生影响,出现一定误差。而对于裸土或植被类型相对均一的草地等区域时,本文的研究将更为适用。本文研究方法也还具有一定的局限性,主要通过逐步回归法进行指数的组合分析,而逐步回归法从数学的角度出发,缺少对于卫星获取地表数据背后物理机制的学习参考。因此从物理意义上着手,更加细致的分析可以为土壤水分反演提供更精确、合理的参考。

基金项目

国家自然科学基金项目(41671336)。

参考文献

- [1] David, R.L. (2011) Soil Moisture: A Central and Unifying Theme in Physical Geography. *Progress in Physical Geography*, **35**, 65-86. <https://doi.org/10.1177/0309133310386514>
- [2] 覃湘栋, 庞治国, 江威, 等. 土壤水分微波反演方法进展和发展趋势[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(10): 1728-1742.
- [3] 肖德安, 王世杰. 土壤水研究进展与方向评述[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1182-1188.
- [4] Zhu, W.B., et al. (2017) A Time Domain Solution of the Modified Temperature Vegetation Dryness Index (MTVDI) for Continuous Soil Moisture Monitoring. *Remote Sensing of Environment*, **200**, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.032>
- [5] Maria, J.E. and Pere, Q. (2016) Comparison of Remote Sensing and Simulated Soil Moisture Datasets in Mediterranean Landscapes. *Remote Sensing of Environment*, **180**, 99-114. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.046>
- [6] 周壮, 赵少杰, 蒋玲梅. 被动微波遥感土壤水分产品降尺度方法研究综述[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(4): 479-485.
- [7] 陈书林, 刘元波, 温作民. 卫星遥感反演土壤水分研究综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(11): 1192-1203.
- [8] 施建成, 杜阳, 杜今阳, 等. 微波遥感地表参数反演进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(6): 814-842.
- [9] 侯英雨, 何延波, 柳钦火, 等. 干旱监测指数研究[J]. 生态学杂志, 2007(6): 892-897.
- [10] Qiu, B., Huang, Y., Chen, C., et al. (2018) Mapping Spatiotemporal Dynamics of Maize in China from 2005 to 2017 through Designing Leaf Moisture Based Indicator from Normalized Multi-Band Drought Index. *Computers and Elec-*

- tronics in Agriculture*, **153**, 82-93. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.07.039>
- [11] 余涛, 田国良. 热惯量法在监测土壤表层水分变化中的研究[J]. 遥感学报, 1997(1): 24-31.
- [12] 杨树聪, 沈彦俊, 郭英, 等. 基于表观热惯量的土壤水分监测[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1157-1161.
- [13] Watson, K., Rowan, L.C. and Offield, T.W. (1971) Application of Thermal Modeling in the Geologic Interpretation of IR Images (Thermal Modeling for IR Images Geologic Interpretation, Discussing Physical Parameters Role in Materials Natural Environmental Diurnal Temperature Behavior): International Symposium on Remote Sensing of Environment, 7th. University of Michigan, Ann Arbor.
- [14] Inge, S., Kjeld, R. and Jens, A. (2002) A Simple Interpretation of the Surface Temperature/Vegetation Index Space for Assessment of Surface Moisture Status. *Remote Sensing of Environment*, **79**, 213-224. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00274-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00274-7)
- [15] Rasmus, F. and Inge, S. (2003) Derivation of a Shortwave Infrared Water Stress Index from MODIS Near- and Short-Wave Infrared Data in a Semiarid Environment. *Remote Sensing of Environment*, **87**, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.07.002>
- [16] 姚云军, 秦其明, 赵少华, 等. 基于 MODIS 短波红外光谱特征的土壤含水量反演[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(1): 9-14.
- [17] 赵泽斌, 晋锐, 田伟, 等. 基于 SiB2 模型的土壤水分降尺度指标的适用性研究[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(2): 195-205.
- [18] 杨永民, 邱建秀, 苏红波, 等. 基于热红外的四种土壤含水量估算方法对比[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(4): 459-467.
- [19] Abduwasit, G., Qiming, Q., Tashpolat, T., et al. (2007) Modified Perpendicular Drought Index (MPDI): A Real-Time Drought Monitoring Method. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **62**, 150-164. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.03.002>
- [20] Zhao, Z., Wang, H., Qin, D., et al. (2021) Large-Scale Monitoring of Soil Moisture Using Temperature Vegetation Quantitative Index (TVQI) and Exponential Filtering: A Case Study in Beijing. *Agricultural Water Management*, **252**, Article ID: 106896. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106896>
- [21] Yang, K., Qin, J., Zhao, L., et al. (2013) A Multiscale Soil Moisture and Freeze-Thaw Monitoring Network on the Third Pole. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **94**, 1907-1916. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00203.1>
- [22] 马春芽, 王景雷, 黄修桥. 遥感监测土壤水分研究进展[J]. 节水灌溉, 2018(5): 70-74.
- [23] 赵英时, 等. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 462-472.
- [24] Ghulam, A., Qin, Q. and Zhan, Z. (2006) Designing of the Perpendicular Drought Index. *Environmental Geology*, **52**, 1045-1052. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0544-2>
- [25] 胡荣辰, 朱宝, 孙佳丽. 干旱遥感监测中不同指数方法的比较研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(17): 8289-8291.
- [26] Nemani, R., Pierce, L., Running, S., et al. (1993) Developing Satellite-Derived Estimates of Surface Moisture Status. *Journal of Applied Meteorology*, **32**, 548-557. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1993\)032<0548:DSDEOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1993)032<0548:DSDEOS>2.0.CO;2)
- [27] 王鹏新, 龚健雅, 李小文. 条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2001(5): 412-418.
- [28] Molero, B., Merlin, O., Malbêteau, Y., et al. (2016) SMOS Disaggregated Soil Moisture Product at 1 km Resolution: Processor Overview and First Validation Results. *Remote Sensing of Environment*, **180**, 361-376. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.045>
- [29] Hong, Z., Zhang, W., Yu, C., et al. (2018) SWCTI: Surface Water Content Temperature Index for Assessment of Surface Soil Moisture Status. *Sensors*, **18**, 2875. <https://doi.org/10.3390/s18092875>
- [30] Wang, L. and Qu, J.J. (2007) NMDI: A Normalized Multi-Band Drought Index for Monitoring Soil and Vegetation Moisture with Satellite Remote Sensing. *Geophysical Research Letters*, **34**, L20405. <https://doi.org/10.1029/2007GL031021>
- [31] 张红卫, 陈怀亮, 周官辉, 等. 归一化多波段干旱指数在农田干旱监测中的应用[J]. 科技导报, 2009, 27(11): 23-26.
- [32] 张洁, 武建军, 周磊, 等. 基于 MODIS 数据的农业干旱监测方法对比分析[J]. 遥感信息, 2012, 27(5): 48-54.
- [33] 魏华, 杜晓, 王世新, 等. 一种新的基于 MODIS 的地表含水量模型构造与验证[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2007, 32(3): 205.
- [34] Zhang, H., et al. (2013) VSDI: A Visible and Shortwave Infrared Drought Index for Monitoring Soil and Vegetation

- Moisture Based on Optical Remote Sensing. *International Journal of Remote Sensing*, **34**, 4585-4609. <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.779046>
- [35] Qin, J., Yang, K., Lu, N., *et al.* (2013) Spatial Upscaling of *In-Situ* Soil Moisture Measurements Based on MODIS-Derived Apparent Thermal Inertia. *Remote Sensing of Environment*, **138**, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.003>
- [36] Gao, S., Zhu, Z., Weng, H., *et al.* (2017) Upscaling of Sparse *in Situ* Soil Moisture Observations by Integrating Auxiliary Information from Remote Sensing. *International Journal of Remote Sensing*, **38**, 4782-4803. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1320444>
- [37] 吴小丹, 闻建光, 肖青, 等. 关键陆表参数遥感产品真实性检验方法研究进展[J]. 遥感学报, 2015, 19(1): 75-92.
- [38] 吴黎, 张有智, 解文欢, 等. 改进的表观热惯量法反演土壤含水量[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(1): 44-49.
- [39] Cho, J., Lee, Y. and Lee, H. (2014) Assessment of the Relationship between Thermal-Infrared-Based Temperature-Vegetation Dryness Index and Microwave Satellite-Derived Soil Moisture. *Remote Sensing Letters*, **5**, 627-636. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.950760>
- [40] Schneider, J.M., *et al.* (2003) Spatiotemporal Variations in Soil Water: First Results from the ARM SGP CART Network. *Journal of Hydrometeorology*, **4**, 106-120. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2003\)004%3C0106:SVISWF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2003)004%3C0106:SVISWF%3E2.0.CO;2)
- [41] Goetz, S.J. (1997) Multi-Sensor Analysis of NDVI, Surface Temperature and Biophysical Variables at a Mixed Grassland Site. *International Journal of Remote Sensing*, **18**, 71-94. <https://doi.org/10.1080/014311697219286>
- [42] 晏红波, 周国清. 地表土壤湿度光学遥感反演方法研究进展[J]. 亚热带资源与环境学报, 2017, 12(2): 82-89.
- [43] 游士兵, 严研. 逐步回归分析法及其应用[J]. 统计与决策, 2017(14): 31-35.
- [44] 王根绪, 沈永平, 钱鞠, 等. 高寒草地植被覆盖变化对土壤水分循环影响研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 653-659.