



田静. 基于指数滤波法的中国区域深层土壤水分估算[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(05): 149-158.

TIAN Jing. Estimation of subsurface soil moisture in China based on exponential filtering method[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(05): 149-158.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.05.14

基于指数滤波法的中国区域深层土壤水分估算

田 静

(中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要 微波遥感技术已经可以实现区域尺度表层土壤水分的观测,但是与生态、水文和农业等领域更密切相关的是深层土壤水分,如何实现由表层土壤水分估算深层土壤水分仍是亟待解决的科学问题。本研究利用中国区域2 121个土壤水分观测站点的多层土壤水分数据(统计数据未含港、澳、台地区。下同),基于10 cm土壤水分,应用指数滤波法分别估算20、30、40和50 cm深度的土壤水分。结果表明:1)随着土壤深度的增加,指数滤波法的估算精度逐渐下降,NSE(纳什效率系数)中值对应4个深度分别为0.76、0.54、0.39和0.28, R^2 (决定系数)中值分别为0.86、0.73、0.64和0.59, RMSE(均方根误差)中值分别为0.023、0.027、0.028和0.028 m^3/m^3 ;2)由2 121个土壤水分站点率定得到的站点最佳 T 值(表征土壤水分从表层运移至深层的时间)的中值估算深层土壤水分具有可行性,尤其估算浅层(如20 cm)土壤水分时,估算结果与用最佳 T 值相比,93%的站点NSE差值 <0.05 ,82%的站点RMSE差值 <0.001 ;3)表层和深层土壤水分的相关性越好,指数滤波法的估算精度越高。综上,指数滤波法在中国区域具有较好的适用性,中国区域 T 的中值,可以作为指数滤波法在中国区域应用的参考值。

关键词 表层土壤水分; 深层土壤水分; 指数滤波法; 中国区域; 土壤水分观测站

中图分类号 P951

文章编号 1007-4333(2024)05-0149-10

文献标志码 A

Estimation of subsurface soil moisture in China based on exponential filtering method

TIAN Jing

(Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100101, China)

Abstract Microwave remote sensing technology is able to realize the observation of regional-scale surface soil moisture, but the deep soil moisture is more closely related to ecological, hydrological and agricultural fields. How to estimate deep soil moisture from surface soil moisture is still a scientific problem to be solved. This study utilized multi-layer soil moisture data from 2 121 soil moisture observation stations across China (Data do not include those of Hongkong, Macao and Taiwan region. The same below) and investigated the application of the exponential filtering method. Based on 10 cm soil moisture data, the exponential filtering method was applied to estimate soil moisture at depths of 20 cm, 30 cm, 40 cm, and 50 cm, respectively. The results show that: 1) With the increase of soil depth, the estimation accuracy of exponential filtering method gradually decreases. The median values of NSE (Nash efficiency coefficient) are 0.76, 0.54, 0.39 and 0.28 corresponding to the four depths, respectively. The median values of R^2 (determination coefficient) are 0.86, 0.73, 0.64 and 0.59, respectively, and the median values of RMSE (Root mean square error) are 0.023, 0.027, 0.028 and 0.028 m^3/m^3 , respectively; 2) It is feasible to estimate

收稿日期: 2023-11-20

基金项目: 鄂尔多斯市科技计划项目(2022YY007); 国家自然科学基金项目(42071327)

第一作者: 田静(ORCID:0000-0002-7442-352X), 副研究员, 主要从事遥感水文专业研究, E-mail: tianj.04b@igsrr.ac.cn

subsurface soil moisture from the median value of the calibrated T , especially for shallow soil moisture (such as 20 cm) estimation. Compared with using calibrated T value, NSE difference is less than 0.05 at 93% sites and RMSE difference is less than 0.001 at 82% sites; 3) The better the correlation between surface and subsurface soil moisture, the higher the estimation accuracy of exponential filtering method. The above results suggest that the EF method has good performance in China. Supported by a large number of measured data, T values of 2, 5, 10 and 14 d corresponding to the depths of 20, 30, 40 and 50 cm, respectively, can be used as references in China when using the EF method with 10 cm soil moisture.

Keywords surface soil water content; subsurface soil water content; exponential filter method; China; soil moisture sites

根系层土壤水分是表征陆表水分状况的重要参量^[1]。其通过影响地表水分收支的变化影响着陆气交换过程,影响着陆表能量和水文过程,进而影响着全球气候变化^[1-3]。土壤水分含量也是全球中期数值天气预报模式和气候预测模式求解时必不可少的初始边界条件,对于改进陆面模式对全球和区域气候的模拟至关重要。同时,对于洪水预报、干旱评估、灌溉管理和水土流失等诸多方面的应用研究也有重要作用^[2-5]。

利用遥感方法可以反演表层土壤水分,其中微波遥感还能够反演具有一定穿透深度的浅层土壤湿度,为区域乃至全球的能量平衡和水循环研究提供了重要科学信息^[6-9]。如果进一步能够获知反映根系层特点的深层土壤水分信息将更有助于生态、水文、农业和气候变化领域的研究^[10-12]。表层和深层土壤水分之间存在显著的线性关系,因此表层土壤水分是估算深层土壤水分的重要信息源^[13-16],目前主要估算方法包括:1)数据同化方法,如SMAP(Soil Moisture Active Passive) L4根系层土壤水分的估算^[17-18];2)机器学习方法,即以表层土壤水分和影响深层土壤水分的土壤属性数据和气象因子作为驱动,建立机器学习模型估算深层土壤水分^[19-21];3)指数滤波方法(Exponential filter),该方法是在假设土壤垂直廓线具有均一的水力传导率和忽略植被蒸腾对土壤水分的影响,通过建立水量平衡模型推导而得。这3类方法中,因为指数滤波法需要较少的输入数据和参数(表层土壤水分是唯一输入数据,表征土壤水分从表层运移至深层的时间(T 值)是唯一参数),近年来被广泛应用于根系层土壤水分的估算^[22-27]。并且,因为表层土壤水分,可以从遥感反演得到,因此利用遥感技术估算深层土壤水分具有较大的应用潜力。此外,由于受土壤水分观测数据的限制,指数滤波法估算深层土壤水分在中国区域还缺乏研究,尤其是无法获得

关键参数 T 值极大地限制了方法的大尺度应用。

因此,本研究拟利用2018—2019年逐日的中国区域2121个土壤水分观测站点的多层土壤水分数据(统计数据未含港、澳、台地区,下同),基于10 cm土壤水分,应用指数滤波法分别估算20、30、40和50 cm深度的土壤水分,首先以2018年数据为基础,逐个站点率定得出参数 T 的最佳值(T_{cal}),基于此再利用2019年的逐日数据估算每个站点的深层土壤水分,通过与2019年观测值对比评估应用效果;其次统计所有站点最佳 T 值的中值(T_{median}),利用此中值估算每个站点的深层土壤水分,通过与最佳 T 值估算结果的比较,评估采用 T 的中值作为整个中国区域 T 值的可行性,并讨论表层土壤水分与深层土壤水分关系对指数滤波法应用的影响,以期实现指数滤波法的区域尺度应用,进而为根系层土壤水分的估算提供支撑。

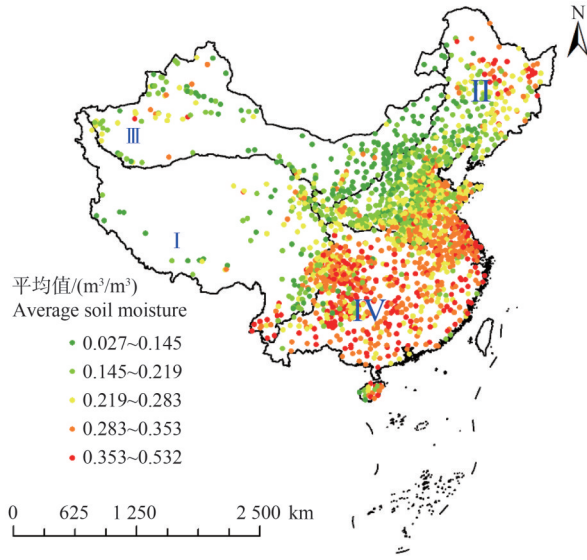
1 土壤水分数据

本研究使用的土壤水分观测数据来源于中国气象局全国土壤水分观测站点,时间跨度为2018—2019年。剔除数据时间不连续和数据存在问题的站点,共使用了2121个站点10、20、30、40和50 cm的日土壤水分数据。站点分布及0~50 cm土壤水分平均值如图1所示。

将中国区域划分为4个地理分区,包括青藏高原区Ⅰ,温带季风区Ⅱ,干旱半干旱区Ⅲ,热带和亚热带季风区Ⅳ。由图1可见:热带和亚热带季风区土壤水分值较高为 $0.31 \text{ m}^3/\text{m}^3$;干旱半干旱区土壤水分最低为 $0.16 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。这类土壤水分的空间分布主要是由降雨的空间分布决定的。

2 研究方法

指数滤波法是Wagner^[22]1999年提出,该方法假设土壤只有2层,即表层和深层。深层土壤水分



基于审图号:GS(2019)1815号。

Based on drawing review No. GS(2019)1815.

I: 青藏高原区; II: 温带季风区; III: 干旱半干旱区; IV: 热带和亚热带季风区。

I: Qinghai-Tibet Plateau; II: Temperate monsoon area; III: Arid and semiarid area; IV: Tropical and subtropical monsoon area.

图1 2018—2019年土壤水分观测站分布及0~50 cm土壤水分平均值

Fig.1 Distribution of soil moisture observation sites and the average soil moisture at 0-50 cm from 2018 to 2019

的变化主要受表层至深层土壤水分的运移决定,根据水量平衡,深层土壤水分基于指数滤波对表层土壤水分进行卷积得到^[23],具体计算公式如下:

$$L \frac{dw_2(t)}{dt} = C[w_1(t) - w_2(t)] \quad (1)$$

式中: L 为深层土壤水分的深度, m; $\frac{dw_2(t)}{dt}$ 是深层土壤水分随时间变化的微分; t 为时间; C 为扩散系数; w_1 和 w_2 分别是表层土壤水分和深层土壤水分。假设土壤廓线具有均一的水力传导率和忽略植被蒸腾对土壤水分的影响, C 作为常数,引入 $T=L/C$,式(1)可以转换成式(2):

$$w_2(t) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^t w_1(\tau) \exp\left[-\frac{t-\tau}{T}\right] d\tau \quad (2)$$

本质上参数 T 包含了影响土壤水分时间变化的所有过程。式(2)积分并用递归的形式表达,指数滤波法最后使用的方程为式(3)。

$$SWI_{2,t_j} = SWI_{2,t_{j-1}} + K_{t_j}(SWI_{1,t_j} - SWI_{2,t_{j-1}}) \quad (3)$$

$$K_{t_j} = \frac{K_{t_{j-1}}}{K_{t_{j-1}} + e^{-\frac{t_j - t_{j-1}}{T}}} \quad (4)$$

式中: SWI 为土壤湿度指数,通常简化为归一化的土壤水分, $SWI=1$ 为饱和土壤水分; SWI_1 和 SWI_2 为表层土壤湿度指数和深层土壤湿度指数;下标 t 为时间, t_j 为 j 时刻, t_{j-1} 为 $j-1$ 时刻; SWI_{2,t_j} 和 $SWI_{2,t_{j-1}}$ 为时刻 t_j 和 t_{j-1} 时的深层土壤湿度指数; SWI_{1,t_j} 为时刻 t_j 的表层土壤湿度指数; K_{t_j} 为时间收益,其计算方法见式(4)。计算过程中初始化 $K_{t_1}=1$, $SWI_{2,t_1}=SWI_{1,t_1}$,进行迭代计算。由式(3)和式(4)可见,表层土壤水分是唯一输入数据,表征土壤水分从表层运移至深层的时间(T 值)是唯一参数。通常,渗透性高的土壤 T 值越小,土壤层深度越浅 T 值也越小。

实际应用中, T 值通过参数率定的方法获得,即利用表层和深层土壤水分的观测值进行率定。本研究将 10 cm 土壤水分作为表层值,检验指数滤波法估算 20、30、40 和 50 cm 土壤水分的能力,因此对应各深度 T 值的获取分别基于 20、30、40、50 cm 土壤水分率定得到。以 2018 年数据为基础,逐个站点率定得出参数 T 的最佳值 (T_{cal}),基于此再利用 2019 年的逐日数据估算每个站点的深层土壤水分,通过与 2019 年观测值对比评估应用效果。具体率定过程为设定 T 值范围为 1~60 d,步长为 1,利用式(3)和(4)依次计算每个 T 值下的深层土壤水分,将估算值与站点实测值进行对比计算决定系数,最大决定系数时的 T 值即为最佳 T 值。依此获取到每个站点对应 20、30、40 和 50 cm 的最佳 T 值。

在有土壤水分观测数据的条件下, T 值能够率定得到,而现实情况下通常无法获得土壤水分观测数据, T 值的确定就成为限制指数滤波法应用的绊脚石。因此获取 T 值的先验知识是实现方法更广泛应用的前提条件。很多研究表明,指数滤波法对 T 值并不十分敏感,即 T 的取值对深层土壤水分估算的影响不十分明显^[22-23,28]。根据本研究测得的 T 值在中国区域的分布特征发现,中国范围内 4 个地理分区上 T 的中值比较接近(图 4),因此本研究计划在整个中国范围内利用 T 的中值估算各站点的深层土壤水分,并将估算结果与用率定得到的 T 值的估算结果进行对比,以此评估利用 T 的中值作为指数滤波法在中国区域应用参数值的可行性。

研究中利用纳什效率系数(Nash Efficiency

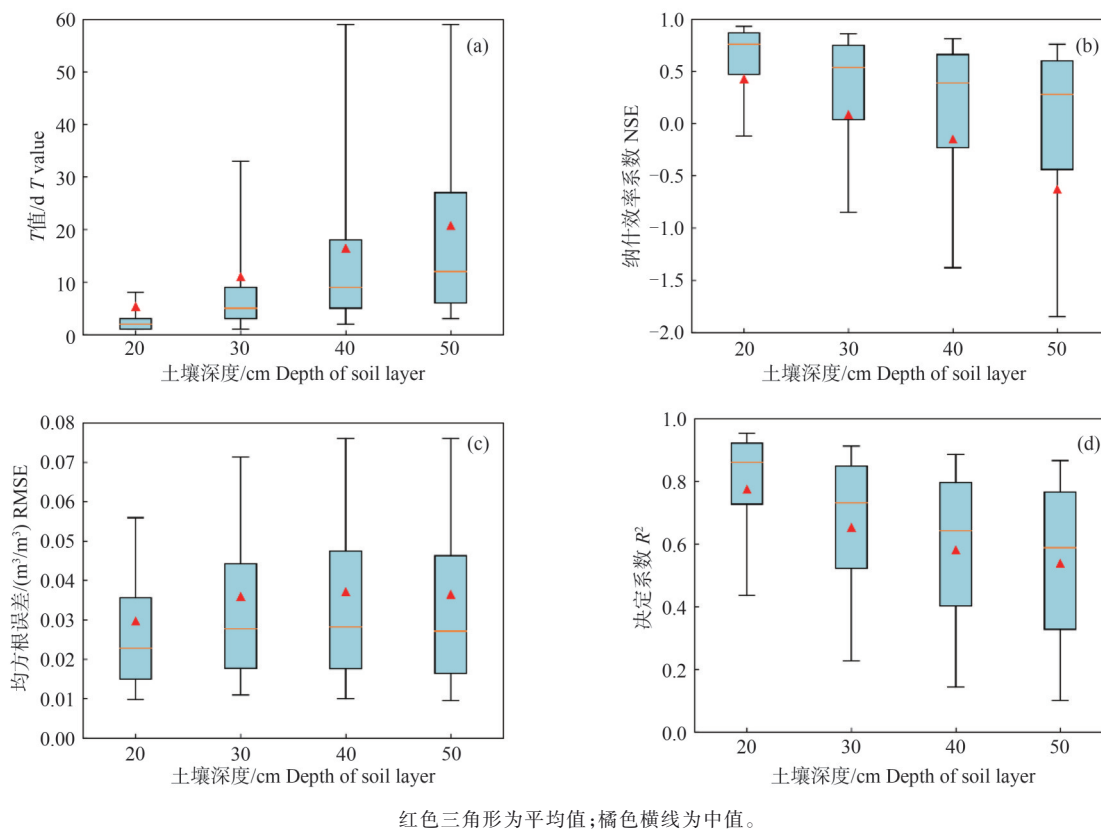
Coefficient, NSE), 均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE) 和 决 定 系 数 (Coefficient of determination, R^2) 评估各深度土壤水分观测值与指数滤波法估算值之间的差异。

3 结果与分析

3.1 站点最佳 T 值及由此估算的深层土壤水分

据式(3)和(4), 利用2018年10~20、10~30、10~40及10~50 cm土壤水分观测值分别率定得到各层的 T 值, 结果如图2(a)所示。可见: 随着土壤深度的增加, T 值逐渐变大且变化范围越离散: 4个深度 T 的中值分别为2、5、9和12 d。利用各个站点率定的 T 值估算2019年深层土壤水分, 后与

观测的土壤水分相比, 各深度得到的土壤水分NSE、 R^2 和RMSE的总体分布情况如图2(b)~(d)所示。可见: 随着土壤深度的增加指数滤波法的估算精度逐渐下降; NSE的中值在4个深度分别为0.76, 0.54, 0.39和0.28, 对应的 R^2 中值分别为0.86, 0.73, 0.64和0.59, RMSE中值分别为0.023, 0.027, 0.028和0.028 m^3/m^3 。土壤深度越大与表层土壤水分的耦合性越弱, 因此基于表层土壤水分的估算精度越低。一些站点的NSE出现负值, 说明指数滤波法效果较差, 这可能是由于表层和深层土壤水分联系较差, 或者由于土壤廓线物理属性差异较大所致, 导致指数滤波法的应用基础不成立。



The red triangle represents the mean, and the orange horizontal line represents the median.

图2 不同土层深度下率定的 T 值(a)及其估算的土壤水分与观测值的纳什效率系数(b)、均方根误差(c)和决定系数(d)

Fig. 2 Calibrated T values (a) and their Nash efficiency coefficient (b), root mean square error (c) and determination coefficient (d) for the estimated soil moisture compared to observed values at different soil depths

所有站点2019年的土壤水分估算值与观测值的对比如图3所示。可见: 各深度的相关性都非常好, 随着深度的增加, 相关性略有下降, 但分布仍集中于1:1线。

以上结果是首先利用观测的表层和深层土壤水分

作为输入进行 T 值的率定, 再利用率定得到的最佳 T 值进行深层土壤水分的估算, 由此证明了在获得最佳 T 值的基础上指数滤波法能够较好地估算深层土壤水分, 在中国区域具有适用性。

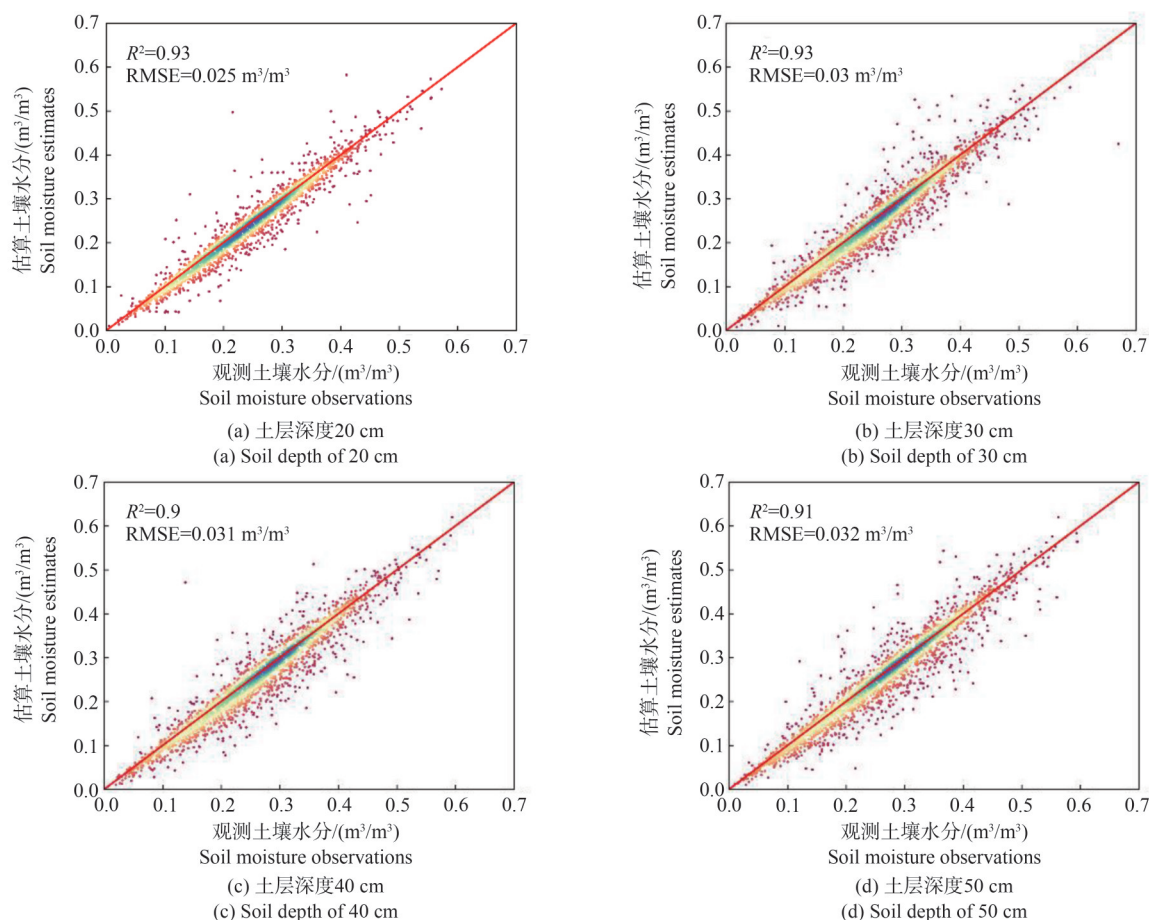


图3 不同土壤深度水分观测值与基于率定的 T 值估算值的对比

Fig.3 Comparison between observed soil moisture and values estimated based on calibrated T values at different soil depths

3.2 T 值在中国区域的分布特征

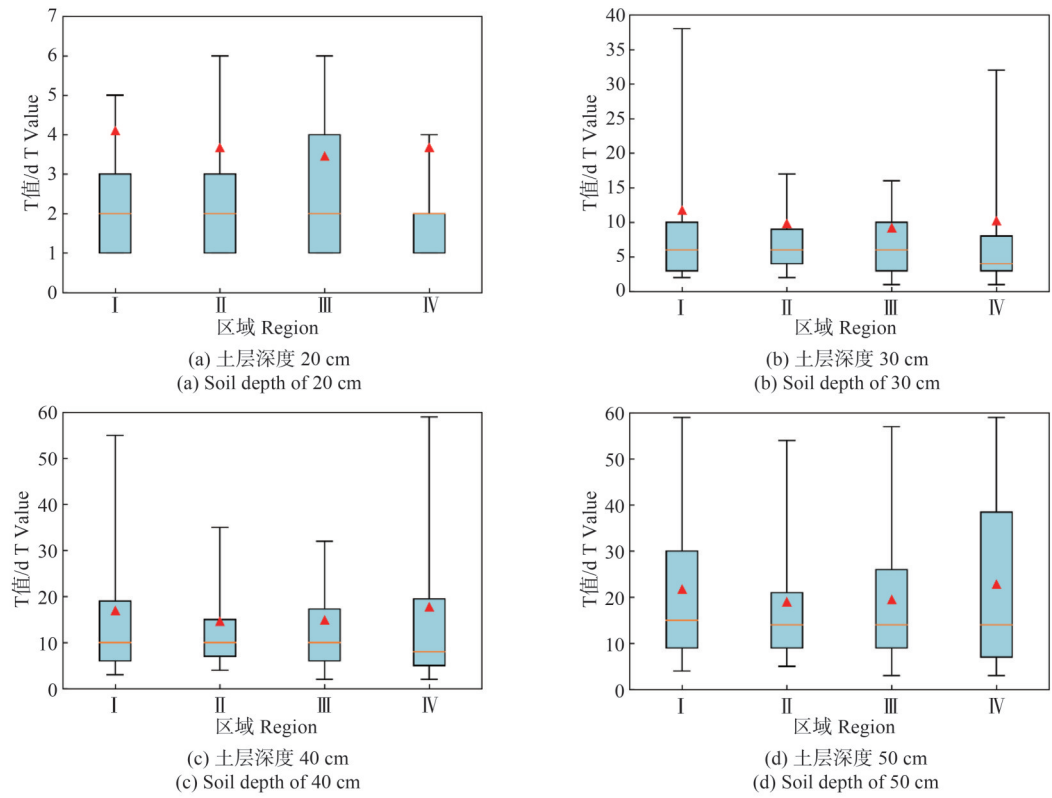
根据4个地理分区分别统计 T 值的变化范围并进行对比,结果见图4。可见:不同地区相同深度 T 的中值比较接近。20 cm时在4个区域 T 的中值 ≈ 2 ;30 cm时南方热带和亚热带季风区 T 中值 ≈ 4 ,其他3个区域 ≈ 5 ;40 cm时同样是南方热带和亚热带季风区 T 中值偏小,其他3个区域约为10;50 cm时4个区域 T 的中值约为14。图4与图2(a)反映的信息相同,随着土壤深度的增加, T 值逐渐变大,这主要是因为 T 值在指数滤波法中代表了表层土壤水分向下传输的时间,随着土壤深度的增加传输时间必然增加。从4个区域 T 值的变化幅度上可以看出,在30、40和50 cm,青藏高原地区和南方地区变化幅度明显高于北方和西北地区,如30 cm,北方和西北地区 T 值变化范围0~20 d,而青藏高原和南方地区变化范围0~40 d。类似的,40 cm时,北方和西北地区 T 值变化范围0~40 d,而青藏高原和南方地区变

化范围0~60 d。另外,各个区域 T 值的变化幅度在50 cm明显大于其他深度。 T 值变化范围的差异可能与土壤性质的空间异质性有关,土壤性质差异越大土壤水分从表层至深层的入渗过程差异可能越大,因此导致 T 值的变化。

3.3 T 中值估算深层土壤水分的可行性

上文分别给出了中国区域2 121个站点率定得到的 T 值分布情况,及由率定的 T 值估算的深层土壤水分与观测值之间的差异。下文则比较了利用整个中国区域 T 的中值估算各站点的深层土壤水分,及利用站点率定得到的 T 值估算各深度土壤水分的结果,以此评估利用 T 的中值作为指数滤波法在中国区域应用参数值的可行性。根据上述率定结果,对应20、30、40和50 cm深度,中国区域 T 的中值分别为2、5、10和14 d。

图5显示了 T 中值和率定 T 值估算深层土壤水分时,与土壤水分观测值相比得到的NSE和RMSE



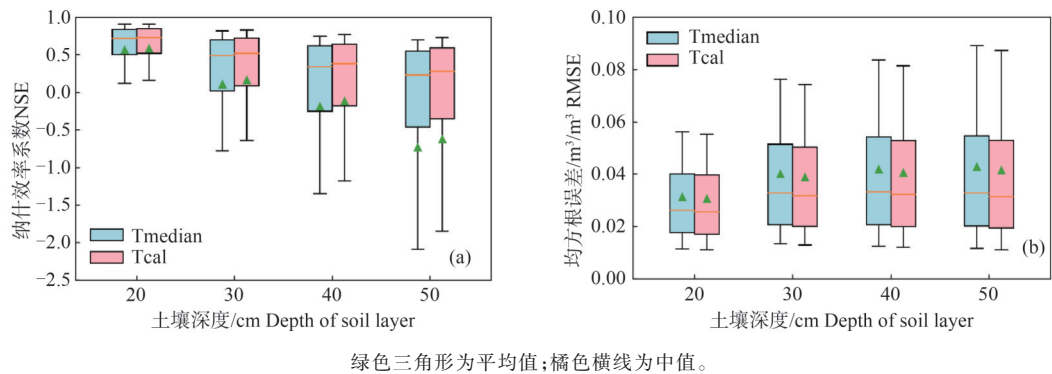
I: 青藏高原区, II: 温带季风区, III: 干旱半干旱区, IV: 热带和亚热带季风区。红色三角形为平均值; 橘色横线为中值。
I: Qinghai-Tibet Plateau; II: Temperate monsoon area; III: Arid and semiarid area; IV: Tropical and subtropical monsoon area. The red triangle represents the mean, and the orange horizontal line represents the median.

图4 4个地理分区对应不同土壤深度T值的分布

Fig. 4 Distributions of T values corresponding to the four geographical regions at different soil depths

的对比。从图5可以看出,两类 T 值估算的深层土壤水分差异较小,各深度NSE的中值之差分别是0.01、0.03、0.04、0.05。RMSE的中值之差分别是0.000 5、0.001、0.001、0.001 4 m^3/m^3 。整体上,率定

T 值估算的深层土壤水分精度略高于使用 T 中值的估算结果,原因显而易见,率定的 T 值是站点得到的最佳 T 值,其估算的深层土壤水分必然好于其他 T 值的估算结果。表1列出了各深度NSE差值分别



The green triangle represents the mean, and the orange horizontal line represents the median.

图5 T 中值(T_{median})和率定 T 值(T_{cal})估算的深层土壤水分与观测值相比的纳什效率系数(a)和均方根误差(b)

Fig. 5 Nash efficiency coefficient (a) and root mean square error (b) comparing deep soil moisture estimated by median (T_{median}) and calibrated T values (T_{cal}) to observed soil moisture values

在 0.01、0.05 和 0.1 范围内, RMSE 差值分别在 0.001、0.003 和 0.005 m³/m³ 范围内, 站点数量占总站点数量的比例, 同时也给出了对应 4 个区域各自的比例。

表 1 T 中值及率定 T 值估算的深层土壤水分与观测值的纳什效率系数差值和均方根误差差值在不同分段范围内站点数量占总站点数量的比例

Table 1 Proportion of the number of sites within different segmented ranges relative to the total number of sites of the differences in Nash efficiency coefficient and root mean square error between deep soil moisture estimated by T median and calibrated T values compared to observed values

土层深度/cm Depth of soil layer	区域 Region	NSE 差值绝对值			RMSE 差值绝对值%		
		Absolute value of NSE difference			Absolute value of RMSE difference		
		0~0.01	0~0.05	0~0.1	0~0.001	0~0.003	0~0.005
20	全国	53	93	97	82	96	98
	青藏高原	59	96	97	86	97	98
	温带季风区	55	93	97	82	95	98
	干旱半干旱区	46	88	96	73	94	98
	热带/亚热带季风区	52	94	98	83	96	98
30	全国	36	79	90	72	91	95
	青藏高原	36	79	87	65	86	91
	温带季风区	39	81	91	75	91	96
	干旱半干旱区	30	77	87	66	91	95
	热带/亚热带季风区	34	78	89	72	90	95
40	全国	30	71	84	68	88	94
	青藏高原	31	71	81	63	83	92
	温带季风区	35	76	87	72	90	95
	干旱半干旱区	30	70	84	69	87	95
	热带/亚热带季风区	25	65	81	64	86	93
50	全国	28	67	79	67	87	93
	青藏高原	22	61	78	62	85	92
	温带季风区	32	74	85	72	90	95
	干旱半干旱区	26	70	82	64	87	92
	热带/亚热带季风区	23	58	71	61	84	91

注: 统计数据未包含港、澳、台地区。下同。
Note: Data do not include those of HongKong, Macao and Taiwan regions. The same below.

估算深层土壤水分, 用 T 中值与用率定 T 值相比, 所有深度上有超过 70% 的站点两者的 NSE 差值 <0.05 , 约超过 60% 的站点 RMSE 的差值 $<0.001\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。再结合图 5, 由此可以说明采用 T 中值估算深层土壤水分不会对其估算精度产生很大的影响, 尤其估算浅层(如 20 cm)土壤水分时, 这种影响更小, 本研究显示 93% 的站点 NSE 差值 <0.05 , 82% 的站点 RMSE 差值 <0.001 。在 4 个地理分区上的结果显示, 总体上, 用 T 中值进行各深层土壤水分的估算, 与用率定的 T 值估算结果相比, 在北方温带季风区的误差最小。如表 1 所示, NSE 差值 <0.01 的站点占比对应 20、30、40 和 50 cm 深度

分别为 55%, 39%, 35% 和 32%。RMSE 差值 $<0.001\text{ m}^3/\text{m}^3$ 在 4 个深度上分别占 82%、75%、72% 和 72%。从图 5 和表 1 也可以看出, 随着深度的增加估算精度有所下降, 这主要是因为深层土壤水分与表层土壤水分的联系会随着土层深度的增加而变差导致的。

指数滤波法的应用基础是表层和深层土壤水分相互耦合, 也就是二者有较好的相关性^[22-23]。图 6 和图 7 分别显示了 2 121 个站点 10 cm 土壤水分与 20、30、40 和 50 cm 土壤水分的互相关系数与利用率定的 T 值估算各层土壤水分得到的 NSE 和 R^2 的相关图。可以看出, 随着互相关系数的增加 R^2 值

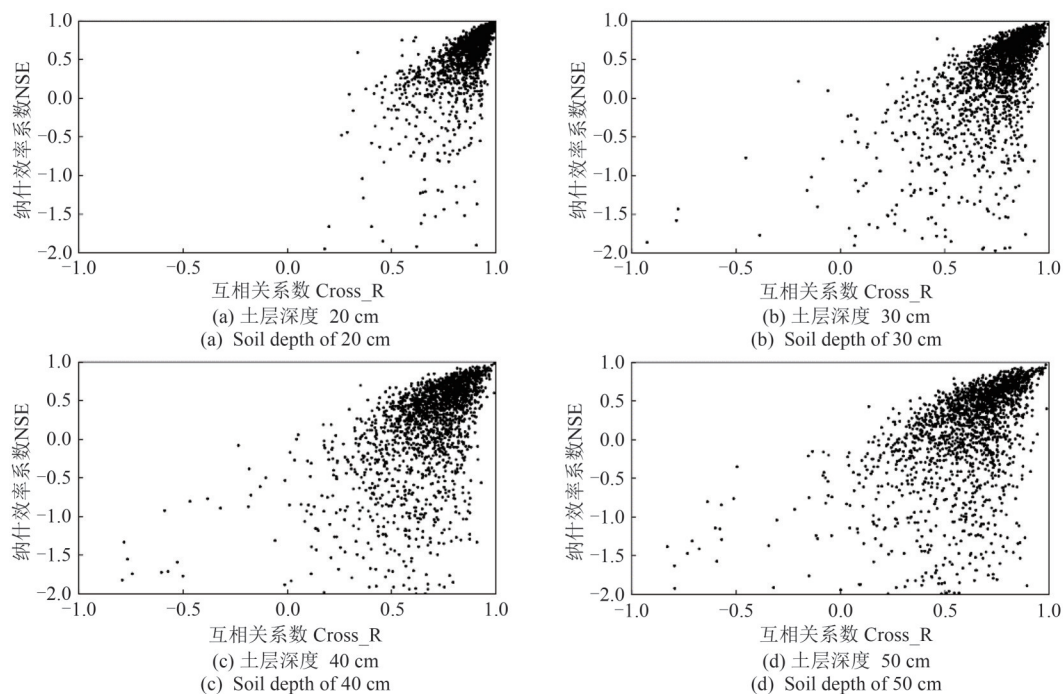


图6 不同土层深度下互相关系数与纳什效率系数的关系

Fig. 6 Relationship between cross correlation coefficient and correlation coefficient and nash efficiency coefficient obtained by exponential filtering method

逐渐变大,说明表层和深层土壤水分的相关性决定了指数滤波法估算的深层土壤水分变化趋势的正确性。从互相关系数与NSE的相关图中则可以看出,随着

互相关系数的增加NSE值也逐渐变大。互相关系数越小NSE离散程度越大,反之NSE离散程度越小,也同样说明表层和深层土壤水分的相关性越好,指数

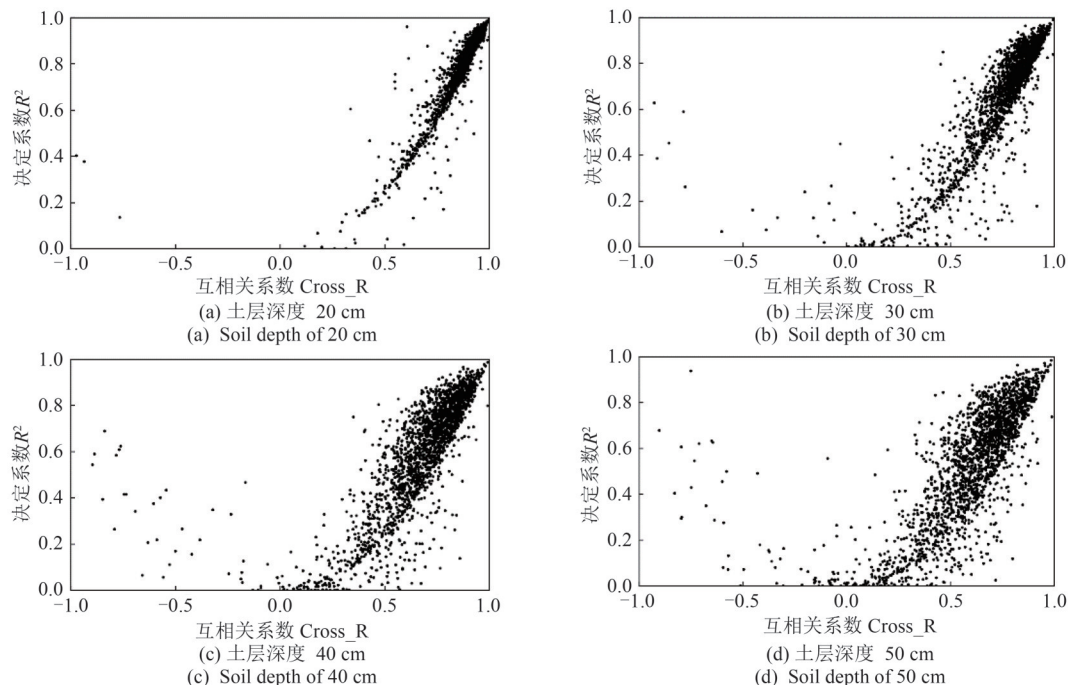


图7 不同土层深度下互相关系数与决定系数的关系

Fig. 7 Relationship between cross correlation coefficient and correlation coefficient and determining coefficient obtained by exponential filtering method

滤波法估算的深层土壤水分精度越高。图6和图7显示出的离散性说明了指数滤波法的不确定性,这种不确定性随着表层和深层土壤水分关系的增加而逐渐变小。

表层和深层土壤水分的关系与土壤类型、土壤物理属性、下垫面条件和气候条件密切相关^[1,28-31],也就导致 T 值在不同站点之间存在差异。例如,Wagner等^[22]和Grillakis等^[25]使用了一个 T 值为20 d来估算0~100 cm深度处的根区土壤湿度;Tian等^[27]在估算中国西北部山区0-70 cm深度处的土壤湿度时得到了一个面积通用的 T 值,为3.5 d;Zhang等^[32]在俄克拉荷马州的一些站点估算得到了 T 值,分别为25 cm深度处的8 d、60 cm深度处的43 d和75 cm深度处的49 d。本研究对应20、30、40和50 cm深度,中国区域 T 的中值分别为2、5、10和14 d。因此对 T 值进行区域尺度拓展可以更进一步提升指数滤波法的应用精度,也是未来研究的重点。

4 结 论

本研究利用中国区域2 121个土壤水分观测站点的数据综合评估了指数滤波法在中国区域的适用性,同时探讨了方法中的唯一参数 T 值在中国区域的先验值。首先利用观测的表层和深层土壤水分作为输入进行 T 值的率定,再利用率定得到的最佳 T 值进行深层土壤水分的估算,基于10 cm土壤水分,应用指数滤波法分别估算20、30、40和50 cm深度的土壤水分。已有研究表明指数滤波法对 T 值并不十分敏感,即 T 的取值对深层土壤水分估算的影响不十分明显,因此本研究在整个中国范围内利用 T 的中值估算各站点的深层土壤水分,并将估算结果与用率定得到的 T 值的估算结果进行对比,以此评估采用 T 的中值作为指数滤波法在中国区域应用的参数值的可行性。另外,本研究还讨论了表层和深层土壤水分关系对指数滤波法应用的影响。

主要结论包括:1)随着土壤深度的增加指数滤波法的估算精度逐渐下降,NSE(纳什效率系数)的中值在4个深度分别为0.76、0.54、0.39和0.28,对应的 R^2 (决定系数)中值分别为0.86、0.73、0.64和0.59,RMSE(均方根误差)中值分别为0.023、0.027、0.028和0.028 m³/m³。由此证明了在获得最佳 T 值的基础上指数滤波法能够较好地估算深层土壤水分,在中国区域具有适用性;2)采用 T 的中值估算深层土壤水分具有可行性,尤其估算浅层(如

20 cm)土壤水分时,估算结果与用率定的 T 值相比,93%的站点NSE差值<0.05,82%的站点RMSE差值<0.001。对应20、30、40和50 cm深度,中国区域 T 的中值分别为2、5、10和14 d,可以作为指数滤波法在中国区域应用的参考值;3)研究发现表层和深层土壤水分的相关性越好,指数滤波法的估算精度越高。本研究的2 121个站点中,10~20 cm,10~30 cm,10~40 cm,10~50 cm土壤水分的互相关性系数>0.5的站点比例分别达到98.5%,91.8%,87.4%和80.4%。也就是说,指数滤波法应用的基本前提在大多数情况下都能得到满足,这也说明了指数滤波法具有普遍适用性。

参考文献 References

- [1] 刘苏峡,邢博,袁国富,莫兴国,林忠辉. 中国根层与表层土壤水分关系分析[J]. 植物生态学报, 2013, 37(1):1-17
Liu S X, Xing B, Yuan G F, Mo X G, Lin Z H. Relationship analysis between soil moisture in root zone and top-most layer in China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(1):1-17 (in Chinese)
- [2] 李轩,过志峰,吴门新,何延波. 华北地区土壤水分时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2021, 32(12):4203-4211
Li X, Guo Z F, Wu M X, He Y B. Temporal and spatial variations of soil moisture in North China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(12):4203-4211 (in Chinese)
- [3] Ines A V, Das N N, Hansen J W, Njoku E. Assimilation of remotely sensed soil moisture and vegetation with a crop simulation model for maize yield prediction [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 138: 149-164
- [4] 杨涛,宫辉力,李小娟,赵文吉,孟丹. 土壤水分遥感监测研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6264-6277
Yang L, Gong H L, Li X J, Zhao W J, Meng D. Progress of soil moisture monitoring by remote sensing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(22): 6264-6277 (in Chinese)
- [5] 包青岭,丁建丽,王敬哲,刘婕,马春玥. 基于VIC模型模拟的干旱区土壤水分及其时空变化特征[J]. 生态学报, 2020, 40(9): 3048-3059
Bao Q L, Ding J L, Wang J Z, Liu J, Ma C Y. Spatio-temporal variation of soil moisture in arid area based on VIC land surface model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(9): 3048-3059 (in Chinese)
- [6] 杨胜天,刘昌明. 黄河流域土壤水分遥感计算及水循环过程分析[J]. 中国科学E辑, 2004, 34(增刊1): 1-12
Yang S T, Liu C M. The soil water remote sensing computations and analyses of water cycle in the Yellow River Basin [J]. *Science in China (Series E)*, 2004, 34(s1): 1-12 (in Chinese)
- [7] 潘宁,王帅,刘焱序,赵文武,傅伯杰. 土壤水分遥感反演研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4615-4626
Pan N, Wang S, Liu Y X, Zhao W W, Fu B J. Advances in soil moisture retrieval from remote sensing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(13): 4615-4626 (in Chinese)
- [8] Dorigo W, Wagner W, Albergel C, Albrecht F, Balsamo G, Brocca L, Chung D, Ertl M, Forkel M, Gruber A, Haas E, Hamer P D, Hirschi M, Ikonen J, De Jeu R, Kidd R, Lahoz W, Liu Y Y, Miralles D, Mistelbauer T, Lecomte P. ESA CCI soil moisture for improved earth system understanding: State-of-the art and future directions [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 203: 185-215

- [9] Owe M, De Jeu R, Walker J. A methodology for surface soil moisture and vegetation optical depth retrieval using the microwave polarization difference index[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2001, 39(8): 1643-1654
- [10] Xu L, Chen N C, Zhang X, Moradkhani H, Zhang C, Hu C L. *In-situ* and triple-collocation based evaluations of eight global root zone soil moisture products[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 254: 112-248
- [11] 李冰冰, 王云强, 李志. HYDRUS-1D模型模拟渭北旱塬深剖面土壤水分的适用性[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 398-404
- Li B B, Wang Y Q, Li Z. Applicability of HYDRUS-1D model in simulating the soil moisture in deep profiles on the Weibei rainfed highland, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 398-404 (in Chinese)
- [12] 张文旭, 祝丹凤, 崔静, 宋江辉, 史晓艳, 王金刚, 杨明凤, 王海江. 基于无人机热成像的棉花根域土壤水分含量估测研究[J]. *中国农业大学学报*, 2024, 29(1): 40-52
- Zhang W X, Zhu D F, Cui J, Song J H, Shi X Y, Wang J G, Yang M F, Wang H J. Estimation of soil moisture content in cotton rhizosphere based on UAV thermal imaging[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(01): 40-52 (in Chinese)
- [13] 杨静敬, 蔡焕杰, 王松鹤, 谢恒星. 杨凌区浅层土壤水分与深层土壤水分的关系研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(3): 53-57
- Yang J J, Cai H J, Wang S H, Xie H X. Relationship between soil moisture in surface layer and in deeper depth in Yangling[J]. *Agricultural Research In the Arid Areas*, 2010, 28(3): 53-57 (in Chinese)
- [14] Mahmood R, Hubbard K G. Relationship between soil moisture of near surface and multiple depths of the root zone under heterogeneous land uses and varying hydroclimatic conditions [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21: 3449-3462
- [15] 邓天宏, 付祥军, 申双和, 朱自玺. 0-50 cm与0-100 cm土层土壤湿度的转换关系研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(4): 64-68
- Deng T H, Fu X J, Shen S H, Zhu Z X. Transforming model of soil moisture between layers of 0-50 cm and 0-100 cm [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(4): 64-68 (in Chinese)
- [16] 刘继龙, 张振华, 谢恒星. 基于表层水分信息的胶东樱桃园深层土壤水分估算研究[J]. *水土保持研究*, 2006, 13: 96-99
- Liu J L, Zhang Z H, Xie H X. Forecasting on deep soil water of cherry orchard of Jiaodong based on surface soil water information[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13: 96-99 (in Chinese)
- [17] Reichle R H, Liu Q, Koster R D, Crow W T, De Lannoy G M, Kimball J S, Ardizzone J V, Bosch D, Colliander A, Cosh M, Kolassa J, Mahanama S P, Prueger J, Starks P, Walker J P. Version 4 of the SMAP Level-4 soil moisture algorithm and data product[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, 11(10): 3106-3130
- [18] Martens B, Miralles D G, Lievens H, Schalie R, De Jeu R, Fernández-Prieto D, Beck H E, Dorigo W A, Verhoest N E. GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture [J]. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(5): 1903-1925
- [19] Kornelsen K C, Coulbaly P. Root-zone soil moisture estimation using data-driven methods[J]. *Water Resource Research*, 2014, 50(4): 2946-2962
- [20] Al-Mukhtar M. Modelling the root zone soil moisture using artificial neural networks, a case study[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75: 1124
- [21] Karthikeyan L, Mishra A K. Multi-layer high-resolution soil moisture estimation using machine learning over the United States [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 266: 112706
- [22] Wagner. A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70: 191-2017
- [23] Albergell C, Rüdiger C, Pellarin T, Calvet J C, Fritz N, Froissard I F, Suquia D, Petitpal A, Piguet B, Martin E. From near-surface to root-zone soil moisture using an exponential filter: An assessment of the method based on *in-situ* observations and model simulations [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2008, 12: 1323-1337
- [24] Tobin K J, Torres R, Crow W T, Bennett M E. Multi-decadal analysis of root-zone soil moisture applying the exponential filter across CONUS [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(9): 4403-4417
- [25] Grillakis M G, Koutroulis A G, Alexakis D D, Polykretis C, Daliakopoulos I. N. Regionalizing root-zone soil moisture estimates from ESA CCI soil water index using machine learning and information on soil, vegetation, and climate[J]. *Water Resource Research*, 2021, 57: 2020wr029249
- [26] Wang T, Franz T E, You J, Shulski, M D, Ray C. Evaluating controls of soil properties and climatic conditions on the use of an exponential filter for converting near surface to root zone soil moisture contents [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 548: 683-696
- [27] Tian J, Han Z B, Bogen H R, Huisman J A, Montzka C, Zhang B Q, He C S. Estimation of subsurface soil moisture from surface soil moisture in cold mountainous areas[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(9): 4659-4674
- [28] Ford T W, Harris E, Quiring S M. Estimating root zone soil moisture using near-surface observations from SMOS [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(1): 139-154
- [29] 岩晓莹, 马理辉, 刘铮, 柯增鸣, 李娟娟, 杨金贵, 胡宇美. 降水增加对黄土高原深层土壤水分的影响[J]. *土壤通报*, 2020, 51(3): 614-620
- Yan X Y, Ma L H, Liu Z, Ke Z M, Li J J, Yang J G, Hu Y M. Effect of precipitation increase on deep soil water content in the Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(3): 614-620 (in Chinese)
- [30] Mahmood R, Littell A, Hubbard K G, You J. Observed data-based assessment of relationships among soil moisture at various depths, precipitation, and temperature[J]. *Applied Geography*, 2012, 34: 255-264
- [31] Karmaker R, Das I, Dutta D, Rakshit A. Potential impacts of climate change on soil properties: A review [J]. *Science International*, 2016, 4(2): 51-73
- [32] Zhang N, Quiring S, Ochsner T, Ford T. Comparison of ythree methods for vertical extrapolation of soil moisture in Oklahoma [J]. *Vadose Zone Journal*, 2017, 16(10): 1-19

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 田静, 中国科学院地理科学与资源研究所副研究员, 硕士生导师。主要从事遥感水文领域的研究, 即: 围绕地表蒸散发和土壤水分的遥感估算及其在水循环与生态水文过程中的作用机理和农业干旱中的应用为核心开展系统研究。先后主持国家自然科学基金项目、国家重点研发计划专题以及中国科学院战略先导项目子课题等10余项。发表学术论文80余篇, 其中SCI论文68篇、参编专著4部及授权国家发明专利8项。