

气候变化下长江源土壤水时空演化及其环境响应

刘 勇, 魏良帅, 黄安邦, 彭 博, 舒勤峰

Spatial and temporal evolution of soil water and its response to the environment in the Yangtze River source area under climate change

LIU Yong, WEI Liangshuai, HUANG Anbang, PENG Bo, and SHU Qinfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202301034>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长江经济带江苏段废弃露天矿山分布与生态修复遥感调查研究

Distribution and ecological restoration of abandoned open-pit mines in Jiangsu section of the Yangtze River Economic Belt

李丽, 杨金中, 陈栋, 于航, 邢宇, 汪洁 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 183-190

基于地表水循环遥感观测的黑河流域水平衡分析

Water balance analysis based on remote sensing observation of surface water cycle in the Heihe River watershed

闫柏琨, 李文鹏, 甘甫平, 郑跃军, 祁晓凡, 白娟, 郭艺, 吴艳红, 王龙凤, 马燕妮 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 44-56

昆仑山地区冻融土导热系数试验测试与预测模型研究

Research on experimental tests and prediction models of thermal conductivity of freezing-thawing soil in the Kunlun Mountains

刘志云, 张伟, 王伟, 崔福庆 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 105-113

毛乌素沙地裸地与植被覆盖下非冻结期土壤水分时空分布特征

Spatial and temporal distribution characteristics of soil moisture in the non-freezing period under the bare land and vegetation cover in the Mu Us desert

高佳, 王文科, 赵明, 马稚桐, 侯昕悦, 李婉歆 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 34-42

桂林会仙湿地狮子岩地下河系统水循环对降水的响应

Response of water cycle to precipitation in Shizhiyan underground river system in Huixian wetland of Guilin

卢丽, 邹胜章, 赵一, 樊连杰, 林永生, 王 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 63-72

三峡库区浮托减重型滑坡对库水升降的响应规律

Response patterns of buoyancy weight loss landslides under reservoir water level fluctuation in the Three Gorges Reservoir area

周剑, 邓茂林, 李卓骏, 张富灵 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 136-143



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202301034

刘勇, 魏良帅, 黄安邦, 等. 气候变化下长江源土壤水时空演化及其环境响应 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 39-52.
LIU Yong, WEI Liangshuai, HUANG Anbang, *et al.* Spatial and temporal evolution of soil water and its response to the environment in the Yangtze River source area under climate change [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 39-52.

气候变化下长江源土壤水时空演化及其环境响应

刘勇, 魏良帅, 黄安邦, 彭博, 舒勤峰

(中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川成都 611734)

摘要: 气候变化下, 长江源区生态环境和水文循环出现了显著改变。土壤水是水文循环的重要组成部分, 正确认识土壤水时空分布规律及其环境响应机制是深入理解长江源区水文循环和生态环境变化的基础。以地面原位观测数据为基础, 利用欧洲航天局最新开发的长时间序列和多传感器组合的全球土壤体积含水量数据集 (ESA CCI SM V07.1) 揭示了长江源区地表土壤水的时空演化规律, 探讨了构造作用和冻土类型对土壤水的影响机制。结果表明: (1) 长江源地表土壤体积含水量主要集中在 $0.15\sim 0.20\text{ m}^3/\text{m}^3$ 之间, 在 6—10 月处于全年最高值; (2) 在垂向上, 由表层到深部土壤体积含水量主要呈现出增大-减小-稳定趋势, 深部土壤水相对表层有明显的滞后特征, 滞后时间一般为 1~2 个月; (3) 在平面上, 地表土壤体积含水量整体呈现东南高, 并向西北逐渐递减的趋势。越临近构造断裂带, 土壤体积含水量越低, 且随深度增加呈现出一定的加剧趋势; (4) 多年冻土区的地表土壤体积含水量相比邻近区域的季节性冻土区域高, 季节性冻土区的地表土壤体积含水量波动变化幅度小于多年冻土区; (5) 近 40 a 来, 地表冻土有逐渐融化趋势, 2000 年后冻土融化加剧, 地表土壤体积含水量增加明显。研究成果对于深入理解长江源区水文循环和生态环境的变化具有重要理论意义, 可为长江源区水文循环和水资源管理提供参考依据。

关键词: 长江源; 土壤水; 冻土; 遥感监测; 环境响应

中图分类号: P641.131

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)05-0039-14

Spatial and temporal evolution of soil water and its response to the environment in the Yangtze River source area under climate change

LIU Yong, WEI Liangshuai, HUANG Anbang, PENG Bo, SHU Qinfeng
(*Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences,
Chengdu, Sichuan 611734, China*)

Abstract: Under the impact of climate change, significant changes have taken place in the ecological environment and water cycle of the Yangtze River source area. Soil water is an important component of the hydrological cycle, and a correct understanding of the spatial and temporal distribution patterns and environmental response mechanisms of soil water is the basis for a deeper understanding of the hydrological cycle and ecological environment changes in the Yangtze River source area. It is also of great significance for promoting the sustainable development of the Yangtze River source area. In this paper, based on ground in-situ observation data, combined with the latest long time-series and multi-sensor combined global soil moisture dataset developed by the

收稿日期: 2023-01-08; 修订日期: 2023-03-07

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20221757)

第一作者: 刘勇 (1989-), 男, 博士, 工程师, 主要从事水文地质和环境地质研究工作。E-mail: 1039786137@qq.com

European Space Agency (ESA CCI SM V07.1), the spatial and temporal evolution of surface soil water in the Yangtze River source area is revealed, and the impact mechanism of structural function and permafrost type on soil water is discussed. The results show that the surface soil moisture in the Yangtze River source area is mainly concentrated between 0.15 and 0.20 m³/m³, with the highest value occurring from June to October. In the vertical direction, the soil moisture content mainly shows an increasing-decreasing-stable trend from the surface to the deep soil layer, and the deep soil water has a significant lag characteristic relative to the surface, with a lag time of generally 1–2 months. In the horizontal direction, the surface soil moisture overall shows a southeast high and northwest gradually decreasing trend. The closer to the structural fault zone, the lower the soil moisture content, and with the increasing depth, it shows a certain aggravating trend. The surface soil moisture content in the permafrost area is higher than that in the neighboring seasonal frozen soil area. The fluctuation range of the surface soil moisture content in the seasonal frozen soil area is smaller than that in the permafrost area. Over the past 40 years, the surface permafrost has shown a trend of gradual melting, and since 2000, the melting of permafrost has intensified, with a significant increase in surface soil moisture content. The results of this study are of great theoretical significance for the in-depth understanding of the hydrological cycle and ecological environment changes in the Yangtze River source area, and can provide a reference basis for the hydrological cycle and water resources management in the Yangtze River source area.

Keywords: Yangtze River source; soil water; permafrost; remote sensing monitoring; environmental response

长江源位于青藏高原腹地,是长江的发源地,是全球重要的生态区和水源涵养区^[1]。土壤水是该区域生态系统和水文循环的重要组成部分,由于气候、地形、土地利用等多种因素的影响,该地区土壤水分状况的时空分布具有明显的差异,而这种差异又受到地质构造和冻土类型等自然因素的影响^[2-3]。因此,探究土壤水的时空演化及其与构造和冻土类型等自然因素的相互作用对该地区的水文循环、生态环境和自然资源的影响具有重要意义。

目前,国内外许多学者已对青藏高原及其周边地区的土壤水进行了相关研究。诸多研究表明,土壤水是陆地水与能量循环过程中的重要纽带,联系着土壤与大气,制约地面蒸发与降雨下渗过程,积累了大量土壤演化与水文过程信息^[4-10]。在青藏高原高寒地区,土壤水是控制冻土形成与退化的重要因素,可通过各种机制影响高寒地区的生态植被、土壤环境及水文过程。目前对土壤水的监测研究主要通过原位观测、数值模拟及遥感反演 3 种手段进行^[11-16]。刘强等^[17]利用双通道土壤水分反演算法和 AMSR-E 卫星数据分析了青藏高原 2003—2010 年间的土壤水分布,发现土壤水的空间变化趋势与降雨和水汽输送的变化基本一致。万国宁等^[18]基于 GAME-Tibet 期间观测的青藏高原中部 BJ 站获取的土壤湿度资料(2001—2005 年),分析了表层土壤水不同时间尺度的变化特征,发

现在湿季土壤湿度显著受到降水的影响,在干季土壤湿度主要受土壤温度的影响。石磊等^[19]基于美国气候预测中心(American Climate Prediction Center, CPC)土壤湿度资料和 80 个青藏高原气象观测站资料,揭示了土壤水分与降雨量在空间分布上基本一致,整体呈现由东南向西北递减的分布特征。卓嘎等^[20]基于美国气候预测中心 1961—2014 年逐月土壤湿度资料和国家气象信息中心降雨数据,分析发现青藏高原春季土壤湿度与长江中下游降水量基本呈负相关关系。一般认为,降雨是土壤水的主要驱动力^[21]。Goyal^[22]通过 1971—2002 年的气象数据分析,认为气温升高可加剧地表土壤的蒸散发,进而影响表层土壤水含量。李元寿等^[23]通过对比几种不同覆盖度高寒草甸下的土壤体积含水量变化,发现多年冻土区土壤水的分布与植被覆盖度关系密切。纵观已有研究,大多集中于全球或青藏高原的大尺度范围内,缺乏对长江源区特殊的高寒生态系统的研究,空间分辨率较低,难以反映区域内的空间差异,对于土壤水与构造和冻土类型等环境因素间的相互作用研究更是不足。

基于此,本文以地面原位观测数据为基础,结合欧洲航天局最新开发的长时间序列和多传感器组合的全球土壤体积含水量数据集(ESA CCI SM V07.1),采用统计学和聚类分析等方法,分析了长江源区地表土壤水的时空演化规律,并探讨了构造作用和冻土类

型对土壤水的影响机制。研究成果有助于深入理解长江源区水文循环和生态环境的变化过程,可为长江源区水资源管理、土地利用和生态保护提供科学依据。

1 研究区概况

长江源位于直门达水文站以上的区域,流域面积

约 $14.73 \times 10^4 \text{ km}^2$ [1]。地形地貌主要受地质构造作用控制,在青藏高原长期抬升作用下,整体地势呈现出西高东低特征,海拔在 $4\,200 \sim 4\,800 \text{ m}$,高差起伏变化较小,地貌多为宽谷与丘陵相间分布 [24] (图 1)。受高寒气候影响,长江源区植被类型简单,以高寒草甸为主,冻土和地下冰发育广泛。区内发育有通天河、楚玛尔河、布曲、当曲和沱沱河等主要河流。

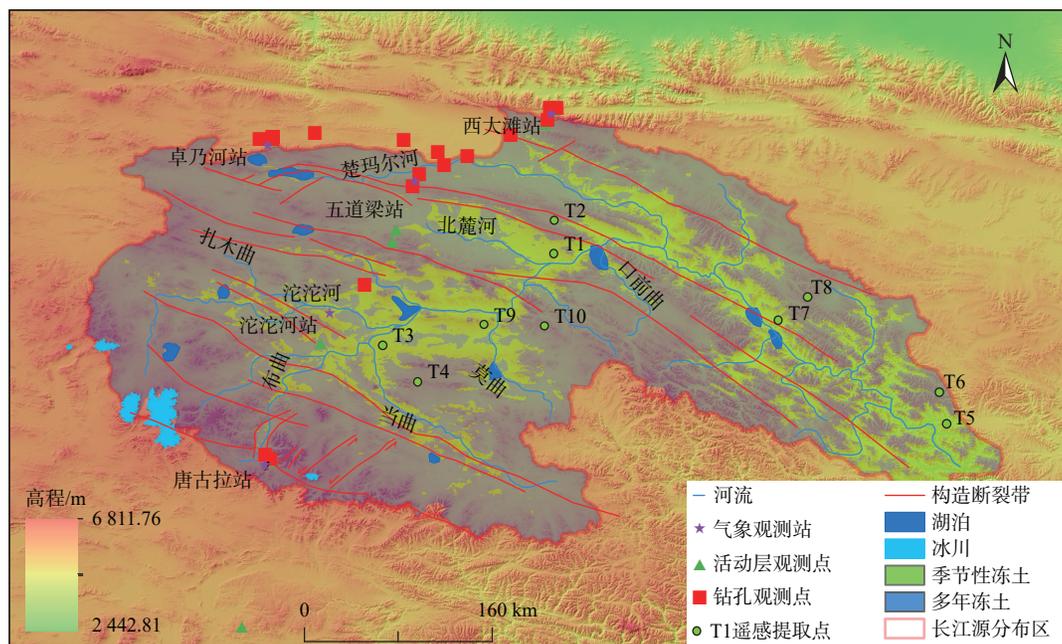


图 1 长江源区域位置分布图 [26]

Fig. 1 Location of the Yangtze River source region [26]

2 材料与方法

2.1 数据来源

(1) 地面监测数据

本次研究的地面监测数据来源于国家青藏高原科学数据中心公布的青藏高原多年冻土综合监测数据集(2002—2018年) [25-26]。该数据集包括长江源区的5个自动气象观测站、12个活动层及20个钻孔长时间序列观测数据,主要观测要素包括气象(气温、降水、风速等)、土壤水热、活动层厚度及冻土温度等观测数据。长江源地面观测点分布如图1所示,可看出长江源区以多年冻土为主,仅在邻近河流两岸分布有季节性冻土。地面观测点分布于源区北侧和西部地区,主要位于五道梁、西大滩、卓乃河和唐古拉山镇一带。

(2) 遥感数据

本次研究采用的遥感产品数据为欧洲航天局(European Space Agency, ESA)水循环观测战略和气候

变化倡议项目框架内最新开发的长时间序列和多传感器组合的全球卫星观测土壤体积含水量数据集(ESA CCI SM V07.1) (<https://esa-soilmoisture-cci.org>)。该数据集提供了全球1978—2021年逐日全球表层土壤体积含水量数据,空间分辨率为 0.25° ,数据以NetCDF-4经典格式存储,包含主动产品(ACTIVE)、被动产品(PASSIVE)和主被动组合产品(COMBINED)3种土壤水分数据。主动产品数据由ERS-1、ERS-2、MetOp-A、MetOp-B及最新的风云3C、3D和ASCAT卫星C波段散射仪的观测结果产生 [27-28]。被动产品数据由Nimbus 7 SMMR、DMSP SSM/I、TRMM TMI、Aqua AMSR-E、Coriolis WindSat、GCOM-W1 AMSR2和SMOS的被动微波观测结果产生。主被动组合产品是通过合并所有主动和被动L2产品而生成的。主动产品以饱和度(%)为单位提供土壤体积含水量,被动产品和主被动组合产品以体积土壤水分(m^3/m^3)为单位提供土壤体积含水量 [3]。

2.2 处理方法

(1) 遥感数据适宜性验证

长江源区冻土较发育。在温度较低的冬春季,地表土壤处于冻结状态,土壤水分成固态,夏季温度较高时,地表冻土出现一定程度的融化。微波传感器对固态土壤水不敏感,监测不到固态土壤水分,且只能监测到表层土壤体积含水量。因此,为避免冻结土壤水对分析结果的影响,在进行遥感数据适宜性验证中只选取温度较高的生长季 6—9 月表层土壤体积含水

量数据进行分析。

根据图 1 地面监测点的分布,已有监测点主要沿长江源中部青藏公路沿线分布,文中分别由北向南选取西大滩站(ch06)、五道梁站(QT08)和沱沱河站(QT05)夏季 6—9 月最表层埋深为 10 cm 处的时序土壤体积含水量数据与 3 种对应时间尺度的 CCI 遥感产品数据进行对比分析(图 2)。选取的 3 个站点时序监测数据完整性好,缺失率低,可靠性好,间距均大于 25 km,能够反映长江源大部分区域的土壤体积含水量特征。

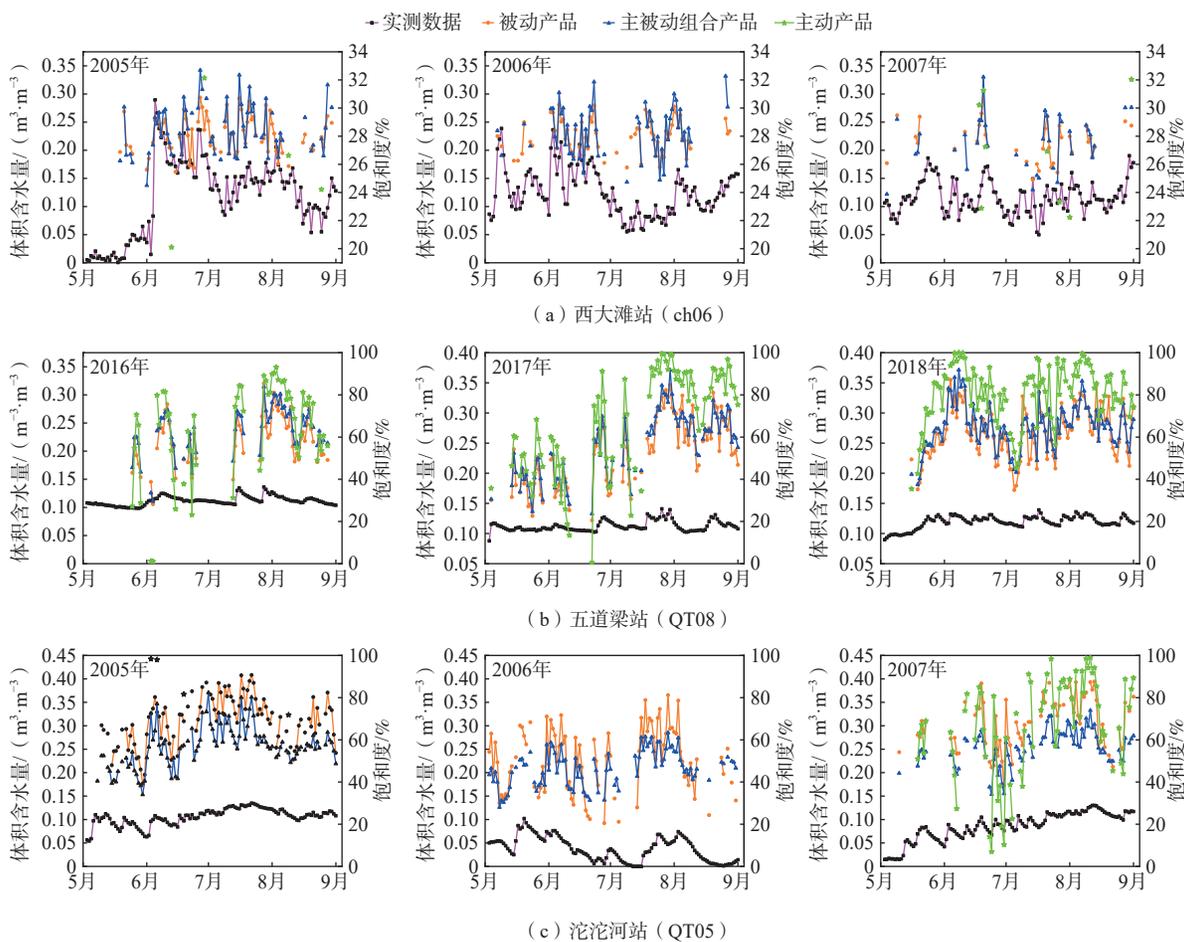


图 2 西大滩站 (ch06)、五道梁站 (QT08)、沱沱河站 (QT05) 实测与 CCI 土壤体积含水量典型时序分布图

Fig. 2 Typical time series of the measured and CCI soil water content at the Xidatan station (ch06), Wudaoliang station (QT08) and Tuotuohe station (QT05)

从图 2 中可看出, 3 种 CCI 产品反演的 3 个区域土壤体积含水量时序变化趋势与实测数据的时序变化趋势近乎一致, 其中主动产品的反演效果较差, 数据缺失程度较高, 被动产品和主被动组合产品捕捉土壤体积含水量效果较好。从 3 个区域的实测数据与被动产品、主被动组合产品数据的对比看, 3 个区域的遥感反演数据均比实测数据有一定程度的偏高, 且

偏高程度从北侧的西大滩到南侧的沱沱河呈逐渐增大趋势。当地表土壤体积含水量被卫星监测时, 通过观测微波辐射, 遥感技术可以得出土壤的电磁特性, 然后推测土壤体积含水量。但实际上, 由于土壤复杂的结构和地表覆盖的多样性, 土壤电磁特性的变化可能不仅是由土壤体积含水量引起的, 也受到其他因素的影响, 例如土壤类型、含沙量、黏土含量等。此外,

卫星观测的空间分辨率相对较低,在 25 km 左右,1 个像素代表的土地面积很大,卫星监测所获得的土壤体积含水量数据实际上是某个空间范围内的平均值,相比特定位置上的实测值存在差异性。因此,尽管卫星遥感技术可以提供广泛的监测覆盖范围和高时间分辨率的土壤体积含水量,但它与实地测量的精度还有一定差距,特别是在具有复杂地表覆盖的地区。因此,如果研究需要更高精度的情况,仍然需要使用实

地测量数据进行校正和验证。

实测数据与 CCI 被动产品、主被动组合产品数据的散点分布见图 3,可看出被动产品数据与主被动组合产品数据均比实测数据出现一定程度的偏大。其中,西大滩和五道梁一带被动产品数据与主被动组合产品数据差异不大,均能很好地反映地表土壤体积含水量的动态变化,在沱沱河一带相比被动产品,主被动组合产品数据更接近实测数据,精度更高。

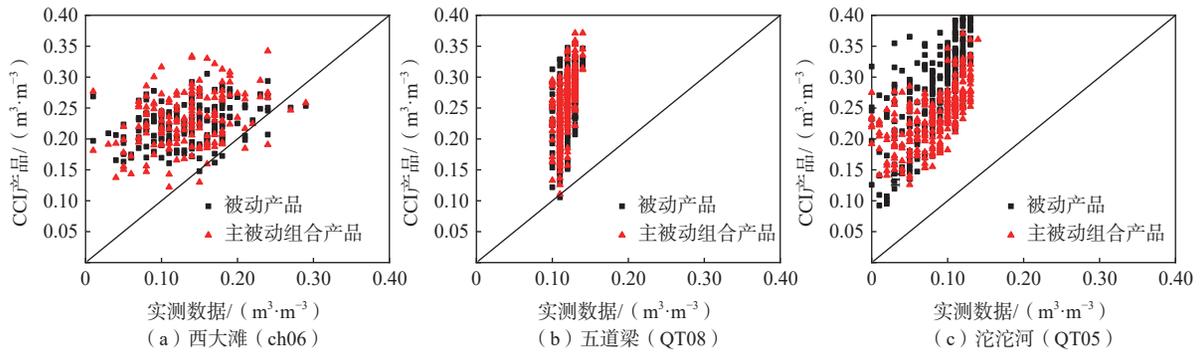


图 3 实测数据与 CCI 遥感反演土壤体积含水量数据散点分布图

Fig. 3 Scattered distribution of the measured data and CCI remote sensing inversion data

将 CCI 被动、主被动组合遥感反演数据与实测数据进行皮尔逊相关性分析,计算结果见表 1。CCI 被动产品数据、主被动组合产品数据均与实测数据相关性显著,均通过了 0.01 级别的显著性检验;相关系数除五道梁被动产品外均处于 0.6~0.8 之间,与实测数据属于强相关程度,其中主被动组合产品数据相比被动产品数据与实测数据的相关程度更高;遥感反演数

据与实测数据的平均相对误差一般为 6%~10% 之间,均方根误差为 6%~11% 之间,除西大滩外,主被动组合产品遥感反演数据与实测数据间的平均相对误差和均方根误差均小于被动产品。因此,在考虑遥感反演数据整体精度条件下,文中选用主被动组合产品数据分析长江源区的土壤体积含水量变化特征。

表 1 CCI 遥感反演数据与实测数据相关性分析

Table 1 Correlation analysis between the CCI remote sensing inversion data and actual measurement data

区域	产品类型	平均值	平均相对误差/%	均方根误差/%	相关系数	案例数
西大滩	被动产品	0.223 7	6.21	8.12	0.612**	174
	主被动组合产品	0.231 1	7.49	10.33	0.634**	157
五道梁	被动产品	0.246 0	8.26	7.28	0.555**	256
	主被动组合产品	0.255 9	7.81	6.17	0.689**	256
沱沱河	被动产品	0.280 4	10.03	9.70	0.702**	258
	主被动组合产品	0.239 3	7.58	9.03	0.725**	280

注:**表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著。

CCI 主被动组合遥感产品与实测数据相关性较高,可用于反演分析长江源区地表土壤体积含水量特征,但仍存在误差。因此,为提高主被动组合遥感产品反演土壤体积含水量数据的精度,需要对数据进行校正。本研究基于现场实测数据,对 CCI 主被动组合产品数据采用拟合回归模型方法进行校正。校正情

况见表 2。校正后的相关系数均大于 0.8,相关性得到了很大程度的提高,相对误差与均方根误差也大幅下降,表明拟合回归模型校正后的 CCI 主被动组合产品数据精度得到提升。

综上所述,CCI 遥感反演组合产品数据能够反映长江源区地表土壤体积含水量的变化过程,基于实测

表 2 CCI 数据校正情况
Table 2 CCI data correction information

区域	校正模型	校正后的 相关系数	平均相对 误差/%	均方根 误差/%
西大滩	$Y=0.3858x+0.0457$	0.807**	4.23	5.71
五道梁	$Y=0.1157x+0.0883$	0.841**	3.11	4.20
沱沱河	$Y=0.4803x-0.0311$	0.815**	3.83	6.33

注: **表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著。

数据采用拟合回归模型校正方法能够提高 CCI 遥感反演数据的精度。

(2) 数据趋势分析

文中采用 M-K 趋势检验法对数据进行趋势分析。在时间趋势序列分析中, M-K 检验是使用最广泛的非参数检验方法, 是一种定量方法。目前被广泛应用于非正态分布的数据趋势和突变分析中, 分析过程计算方便。进行突变检验的具体步骤如下^[29]:

①对时间序列 x_i , 构造秩序列 r_i 表示 $x_i > x_j$ ($1 \leq j \leq i$) 等样本累计数, 定义 s_k 为:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i r_j = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (1)$$

式中: $j = 1, 2, \dots, i$ 。

②假定时间序列随机独立, 定义统计变量为:

$$UF_k = \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{Var(s_k)}}, \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

式中: UF_k ——标准正态分布统计量;

$E(s_k)$ —— s_k 的均值;

$\sqrt{Var(s_k)}$ —— s_k 的方差。

其中, $UF_1=0$, 并且在给定显著水平 a 下, 若 $|UF_k| \geq U_a$, 则表明序列存在明显的趋势变化:

$$E(s_k) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (3)$$

$$Var(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (4)$$

③将时间序列 x_i 按逆序排列, 再重复①和②步骤, 同时使:

$$UB_k = -UF_k, \quad k = n, n-1, \dots, 1 \quad (5)$$

其中, $UB_1=0$ 。通过分析统计序列 UB_k 和 UF_k 可以进一步分析序列 x_i 突变的时间节点, 显示突变的区域。若 $UF_k > 0$, 则表明序列呈上升趋势; $UF_k < 0$ 则表明呈下降趋势; 当超过任何一条临界线时, 表明上升或下降趋势显著。如果 UB_k 和 UF_k 曲线出现交点, 且两交点在两临界线之间, 则交点对应的时期为时间序列值突变的开始时期。

3 结果

3.1 土壤水剖面分布特征

长江源典型监测点土壤体积含水量月均值和年均值的时序动态变化如图 4 所示。其中月均值是多年同月数据的平均值, 年均值是全年数据的平均值。

从图 4 中可知, 位于长江源西北侧的卓乃河一带 2014—2020 年间表层 40 cm 深度范围内平均土壤体积含水量为 0.02 ~ 0.32 m³/m³, 埋深 40 cm 处的土壤体积含水量高于埋深 10 cm 处的土壤体积含水量; 6—10 月土壤体积含水量较高, 9 月土壤体积含水量达到最大值; 在 2014—2020 年间土壤体积含水量整体呈现逐年递增趋势, 2018 年出现拐点达到最大值。长江源北侧西大滩区域 2005—2016 年间埋深 180 cm 范围内的土壤体积含水量为 0 ~ 0.16 m³/m³; 从逐月时序变化数据看, 生长季 40 cm 深度范围内土壤体积含水量在垂向有略微降低趋势, 100 cm 深度处土壤体积含水量相比 40 cm 深度范围有明显的滞后特征(滞后时间近 1 个月), 深埋 180 cm 处的土壤体积含水量相比表层波动较小, 滞后时间较长(约 3 个月); 7—8 月土壤体积含水量出现最大值; 整体上有逐年递增趋势。西大滩南侧五道梁一带 2012—2018 年埋深 240 cm 范围内的土壤体积含水量为 0 ~ 0.36 m³/m³, 6—10 月土壤体积含水量较高; 深度 200 cm 范围内土壤体积含水量最大值由表层向深部逐渐增加, 埋深 200 cm 处的土壤体积含水量相对埋深 120 cm 处滞后时间较长(约 2 个月), 埋深大于 200 cm 的土壤体积含水量 2018 年间这一区域的土壤体积含水量除埋深 120 cm 附近的土壤体积含水量有逐渐降低外, 整体上呈相对平稳并有略微递增的趋势。从北麓河 2004—2008 年的监测数据看, 土壤体积含水量为 0 ~ 0.36 m³/m³, 在 5—10 月较大, 最大值出现在 8—9 月, 由表层到深部土壤体积含水量变化呈现波动状, 埋深 50, 180 cm 处出现 2 个土壤体积含水量峰值, 埋深 50 cm 处的土壤体积含水量变化相对表层 5 cm 处出现 2 个土壤体积含水量峰值, 埋深 50 cm 处的土壤体积含水量变化相对表层 5 cm 处滞后约 1 个月, 在 2004—2008 年间各层土壤体积含水量整体相对平稳, 仅埋深 90 cm 附近的土壤体积含水量出现略微递减趋势, 而深部 240 cm 附近的土壤体积含水量在 2012 年后出现递增趋势。沱沱河一带 2004—2008 年间的监测数据表明, 土壤体积含水量由表层到深部呈现先增加再减少的特征, 埋深 90 cm 附近的土壤体积含水量最高, 监测期间各层土壤体积含

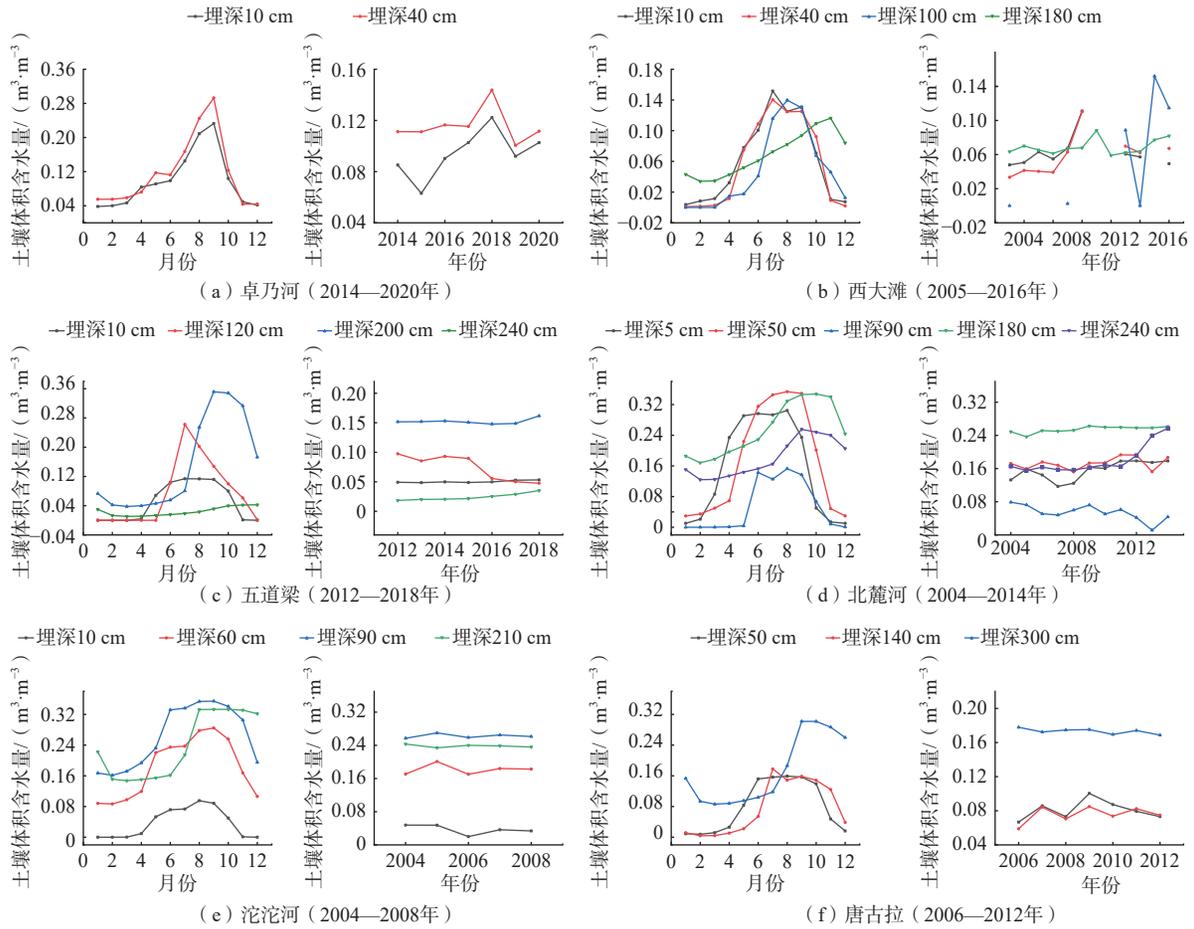


图4 长江源典型监测数据逐月和逐年时序变化特征

Fig. 4 Time-series variation characteristics of the typical monitoring data of the Yangtze River source from month to month and from year to year

水量整体平稳。长江源南侧唐古拉区域 2006—2012 年间的监测数据表明,土壤体积含水量由表层到深部呈现出先减小后增加的趋势,深度 140 cm 范围内的土壤体积含水量呈波动状,埋深大于 300 cm 的土壤体积含水量相对平稳。

综上所述,长江源区埋深 300 cm 范围内的土壤体积含水量月均值为 $0 \sim 0.36 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 全年变化呈上凸状,在 6—10 月较高;在垂向剖面上由表层到深部主要呈现出增大-减小-稳定趋势,局部地区呈现出增大-减小-增大-减小-稳定特征,深部土壤体积含水量相对表层有明显的滞后趋势,滞后时间一般为 1~2 个月;浅表层土壤体积含水量受环境影响较大,呈波动起伏状,略有逐渐递增的趋势,其中长江源北侧表层土壤体积含水量递增趋势最为明显。

3.2 土壤水平面分布特征

微波传感器对固态土壤水不敏感,监测不到固态土壤水分。因此,为避免冻结土壤水对分析结果的影

响,文中选取温度较高的 7—9 月土壤体积含水量数据进行分析,基于 CCI 主被动组合产品数据分析了 1980、2000、2020 年 7—9 月地表土壤体积含水量分布,见图 5。由于微波辐射的穿透深度比较浅,通常为 $0 \sim 10 \text{ cm}$,因此文中基于微波传感器观测的土壤体积含水量深度一般为 10 cm 以内。

从图 5 中 7—9 月长江源区地表土壤体积含水量空间分布数据可以看出,西侧边缘区域大多处于常年冻结状态,地表土壤体积含水量数据多出现缺失;2000 年前长江源区地表土壤体积含水量整体呈现出东南高,并向西北逐渐递减的趋势,即长江源区东南玉树一带土壤体积含水量最高,而西北卓乃河一带的土壤体积含水量最低;2000 年后地表土壤体积含水量以快速增长为主,尤其北部西大滩、卓乃河和南部当曲流域一带增加明显。当曲流域南邻唐古拉山,夏季地表土壤体积含水量快速增长,极可能是受冰川融化加剧的影响。

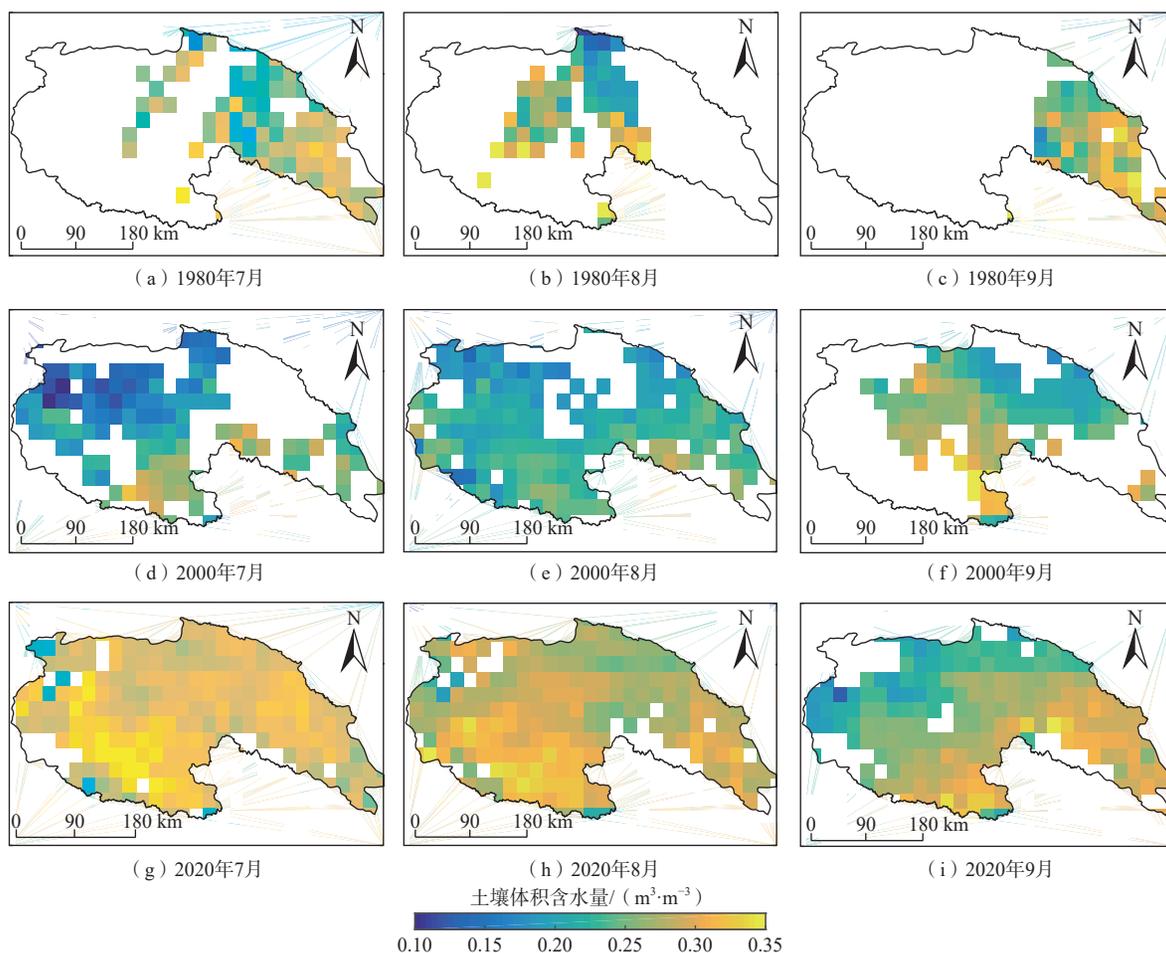


图 5 长江源区 1980、2000、2020 年 7—9 月土壤体积含水量空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of soil water in July-September from 1980 to 2020 in the Yangtze River source area

因微波传感器对固态土壤水不敏感,监测不到固态土壤水分,造成遥感反演数据的缺失。从图 5 中遥感反演数据的缺失程度看,近 40 a 来的数据缺失率呈逐渐降低趋势,尤其 2000 年后的数据缺失率显著降低,反映了近 40 a 来长江源区地表冻土有逐渐融化趋势,2000 年后冻土融化加剧,地表土壤体积含水量增加明显,尤其冰川发育的西南唐古拉山一带更为显著。

分别提取长江源称多县、治多县、曲麻莱县曲麻河乡、治多县索加乡等 9 个区域内 1980—2021 年间的时序土壤体积含水量遥感反演数据,对各区域进行统计如图 6 所示。

从图 6 中可看出长江源地表土壤体积含水量主要集中在 0.15 ~ 0.35 m³/m³ 之间,东部通天河流域地表土壤体积含水量呈现由东部称多县向西部曲麻河乡逐渐递减的趋势;西部地区由南向北也呈现递减特征,其中唐古拉山镇相比南侧唐古拉站一带地表土壤体积含水量下降微弱,且土壤体积含水量变幅较小,相对集中,而北侧五道梁地区地表土壤体积含水量下降

明显,变幅较大;长江源北部边缘地区,地表土壤体积含水量由东侧的西大滩向西侧的卓乃河地区呈现出递减特征。

对长江源区 2010—2020 年 7—9 月生长季的平均土壤体积含水量进行统计,长江源地区地表平均土壤体积含水量为 0.17 m³/m³。近 10 a 生长季地表土壤体积含水量大多处于 0.15 ~ 0.20 m³/m³ 之间(表 3)。

4 讨论

4.1 地质构造作用对土壤水的影响

地表土壤水的变化主要受降水、气温等气候因素的控制。其中降水对表层土壤体积含水量的影响非常显著,当降水发生时,部分水分会被表层土壤吸收,从而直接增加表层土壤体积含水量。降水也可改变表层土壤的结构,从而影响土壤的渗透性和水分保持能力。在干燥的天气中,土壤表面可能变硬,水分难以渗透到土壤深处,而当降水发生时,降雨可以冲刷土壤表面,会增加表层土壤的渗透性,使得水分能够

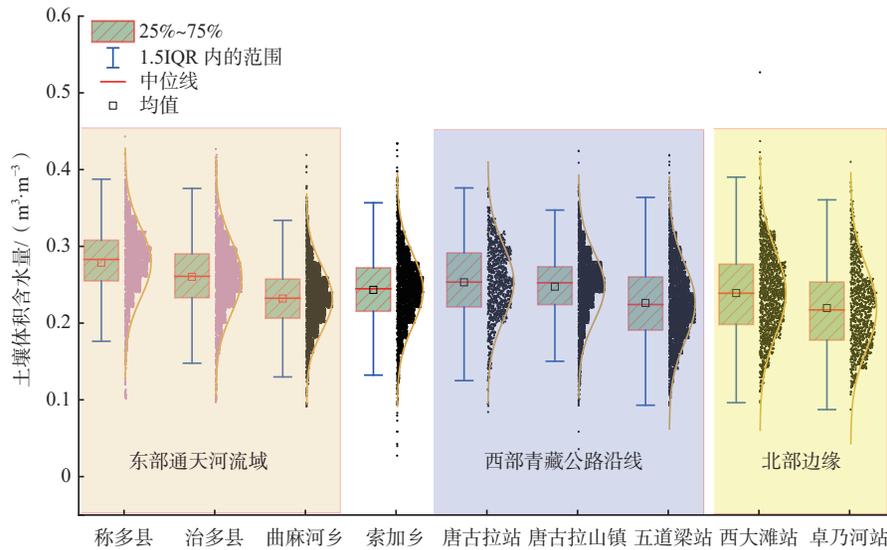


图 6 长江源土壤体积含水量统计图

Fig. 6 Soil water content statistics of the Yangtze River source area

表 3 不同等级土壤体积含水量面积比值

Table 3 Area ratio of soil water content of different grades

土壤体积含水量/(m ³ ·m ⁻³)	<0.1	0.1 ~ <0.15	0.15 ~ <0.20	0.20 ~ 0.25
面积占比/%	8.07	13.45	54.26	24.22

更容易地渗透到土壤深处,并在土壤中储存,有利于提高土壤水分的利用效率,从而增加表层土壤湿度。降雨条件下土壤表面的水分蒸发速度也会出现减缓,从而降低土壤水分的流失速度,增加表层土壤体积含水量。但如果环境温度较高,蒸发速度可能会更快,这可能会减少土壤中的水分,从而影响表层土壤体积含水量^[30-31]。

在长江源独特的地质环境条件下,地质构造作用与冻土环境对土壤水的分布也具有重要影响。长江源区构造断裂带较发育,多呈北西—南东走向,分布密度较大。为探究地质构造作用对土壤体积含水量的影响,根据地面活动层监测点的分布,选取五道梁和西大滩附近邻近构造断裂带的 2 组地面监测数据进行分析。2 组站点均位于多年冻土区,其中 QT01 站点位于五道梁附近的构造断裂带上, ch06 站点邻近西大滩附近的构造断裂带, QT08 和 QT09 站点分别距最近构造断裂带距离为 9.26, 13.12 km(表 4)。

表 4 构造断裂影响站点信息

Table 4 Information on sites affected by tectonic rupture

站点编号	位置	距断裂距离/km	冻土类型
QT01	五道梁	0	多年冻土
QT08	五道梁	9.26	多年冻土
ch06	西大滩	0	多年冻土
QT09	西大滩	13.12	多年冻土

考虑到地表受气候和人类工程活动直接影响较大,选取埋深大于 1 m 的土壤体积含水量进行分析,五道梁和西大滩 2 处埋深为 1 m 和近 2 m 处的土壤体积含水量动态见图 7。埋深 1 ~ 2 m 范围内的土壤体积含水量呈现明显的季节性波动,2 组站点土壤体积含水量均呈现出显著相关性,表明 2 组站点受环境影响均相近;埋深 1 m 处, QT01 土壤体积含水量均大于 0,未出现完全冻结期,而 QT08 每年出现近 7 个月的完全冻结期,2 处土壤体积含水量差异较小,远离构造断裂带的 QT08 和 QT09 站点处的土壤体积含水量略大于邻近断裂带的 QT01 和 ch06;埋深近 2 m 处,到构造断裂带的距离对土壤体积含水量的影响较大, QT08 和 QT09 站点处的土壤体积含水量远大于邻近构造断裂带的 QT01 和 ch06,其中 QT08 与 QT01 的最大差值约为 0.3, QT09 与 ch06 的最大差值约为 0.1。

根据构造断裂活动特征,邻近构造断裂带的土壤完全冻结期较短,极可能是由于构造活动产生的地热能所致,地热能使土壤温度升高,降低土壤的完全冻结期;构造活动使断裂带附近岩土体破碎,拓展并丰富地下导水通道,加之构造活动产生的地热能可增加土壤水活性,促进水分流通,造成土壤体积含水量降低,且随深度增加,构造活动性增强,土壤水分流失加剧,因此在平面上越临近构造断裂带,土壤体积含水量越低,且随深度增加呈现出一定的加剧趋势。

4.2 冻土类型对土壤水的影响

从图 1 长江源区河流与冻土分布图看,受河流热传递影响,河流沿线邻近区域冻土类型几乎为季节性

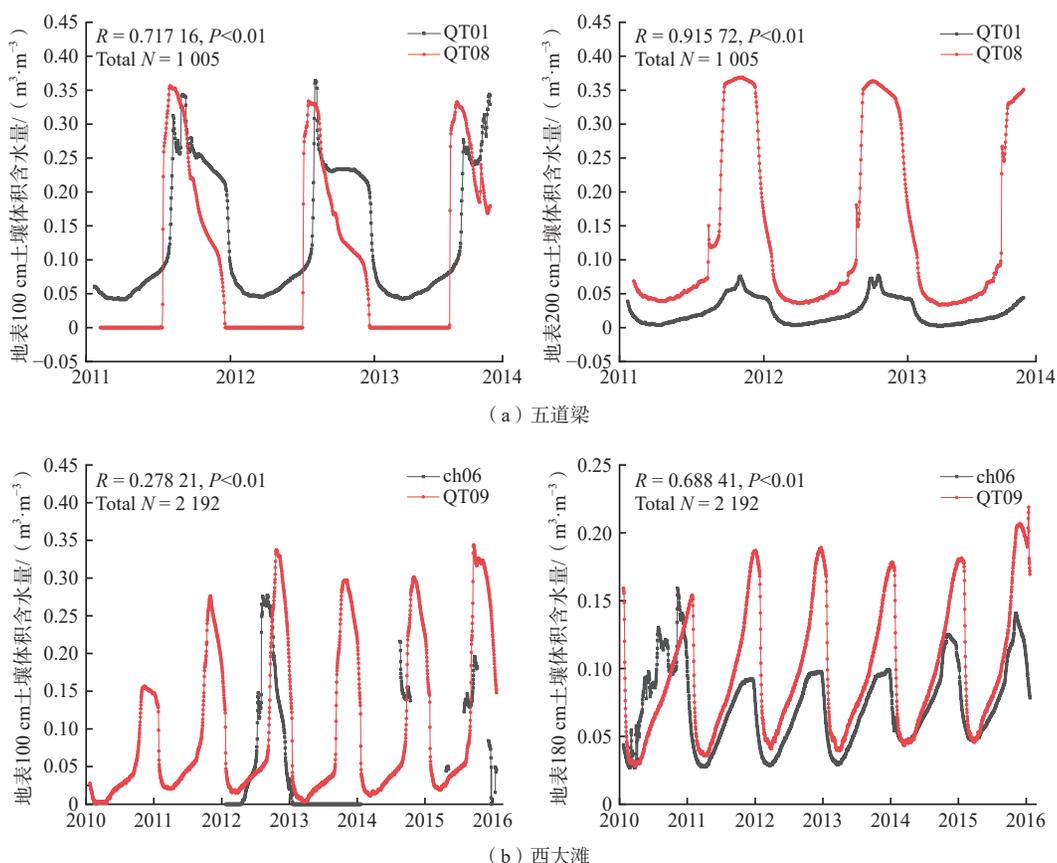


图 7 五道梁和西大滩土壤体积含水量动态曲线图

Fig. 7 Dynamic curves of soil water content in Wudaoliang and Xidatan

冻土, 远离河流区域均为多年冻土。自东向西分别选取 5 组临近的不同冻土类型遥感监测点进行分析, 各监测点分布见图 1。因各组遥感监测区域缺少实测数据, 且相临区域遥感数据影响接近, 因此对不同冻土

类型土壤体积分含水量的分析直接采用遥感监测点提取数据。各组监测点体积分含水量演化趋势线性拟合结果见图 8。

从图 8 中可看出, 1979—2021 年间各监测区域地

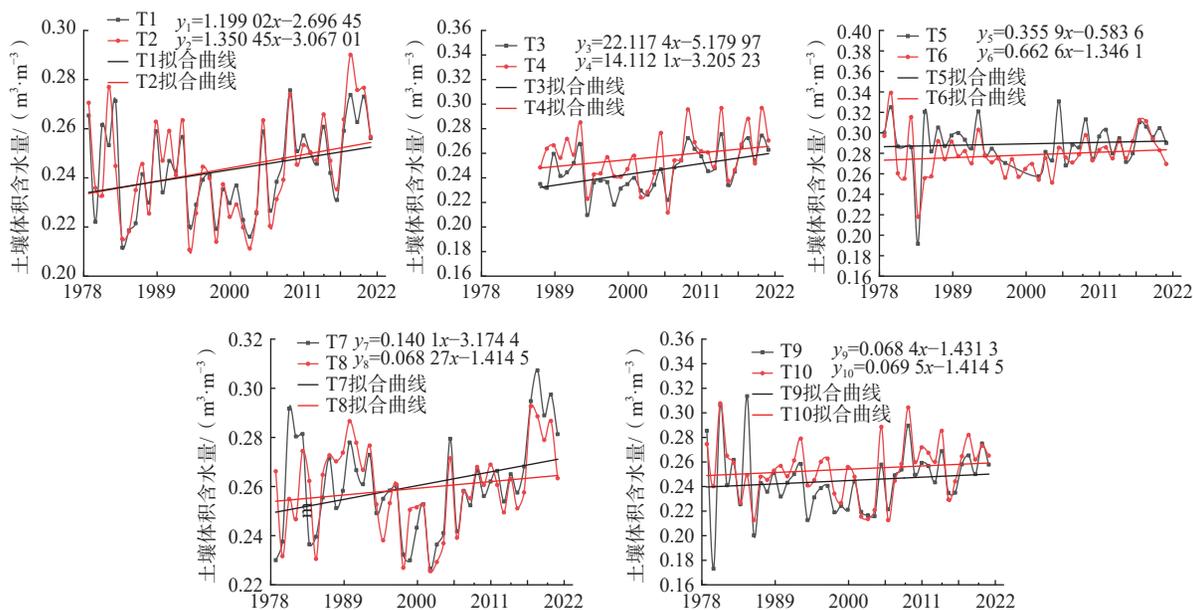


图 8 监测点年平均土壤体积分含水量时序曲线

Fig. 8 Time-series curves of annual average soil water content at the monitoring sites

表土壤年平均体积含水量呈波动状,季节性冻土与多年冻土体积含水量动态变化趋势近乎一致,整体上有递增趋势。其中多年冻土体积含水量为 $0.21 \sim 0.34 \text{ m}^3/\text{m}^3$,季节性冻土体积含水量为 $0.17 \sim 0.33 \text{ m}^3/\text{m}^3$;从土壤体积含水量标准差看,除东部曲麻莱地区多年冻土(T8)体积含水量波动程度略小于邻近的季节性冻土(T7)外,其余各区域多年冻土(T2、T4、T6、T10)体积分含水量的波动程度均大于邻近的季节性冻土(T1、T3、T5、T9);从土壤体积分含水量的中位值看,除称多县多年冻土(T6)体积分含水量值略小于邻近季节性冻土(T5)外,

其余各区的多年冻土体积分含水量整体值均较季节性冻土高;从递增斜率看,东部曲麻莱地区和西部唐古拉地区的多年冻土(T8、T4)体积分含水量增加程度略小于邻近的季节性冻土(T7、T3),其余各区的多年冻土体积分含水量递增程度均大于邻近的季节性冻土。

利用M-K突变检验法对土壤体积分含水量数据进行突变检验(图9)。北麓河一带的季节性冻土(T1)体积分含水量在1979—2010年间除1983年出现短暂的上升外($UF>0$),整体呈下降趋势($UF<0$),2010—2021年呈上升趋势,2016年出现突变点;多年冻土(T2)体积分

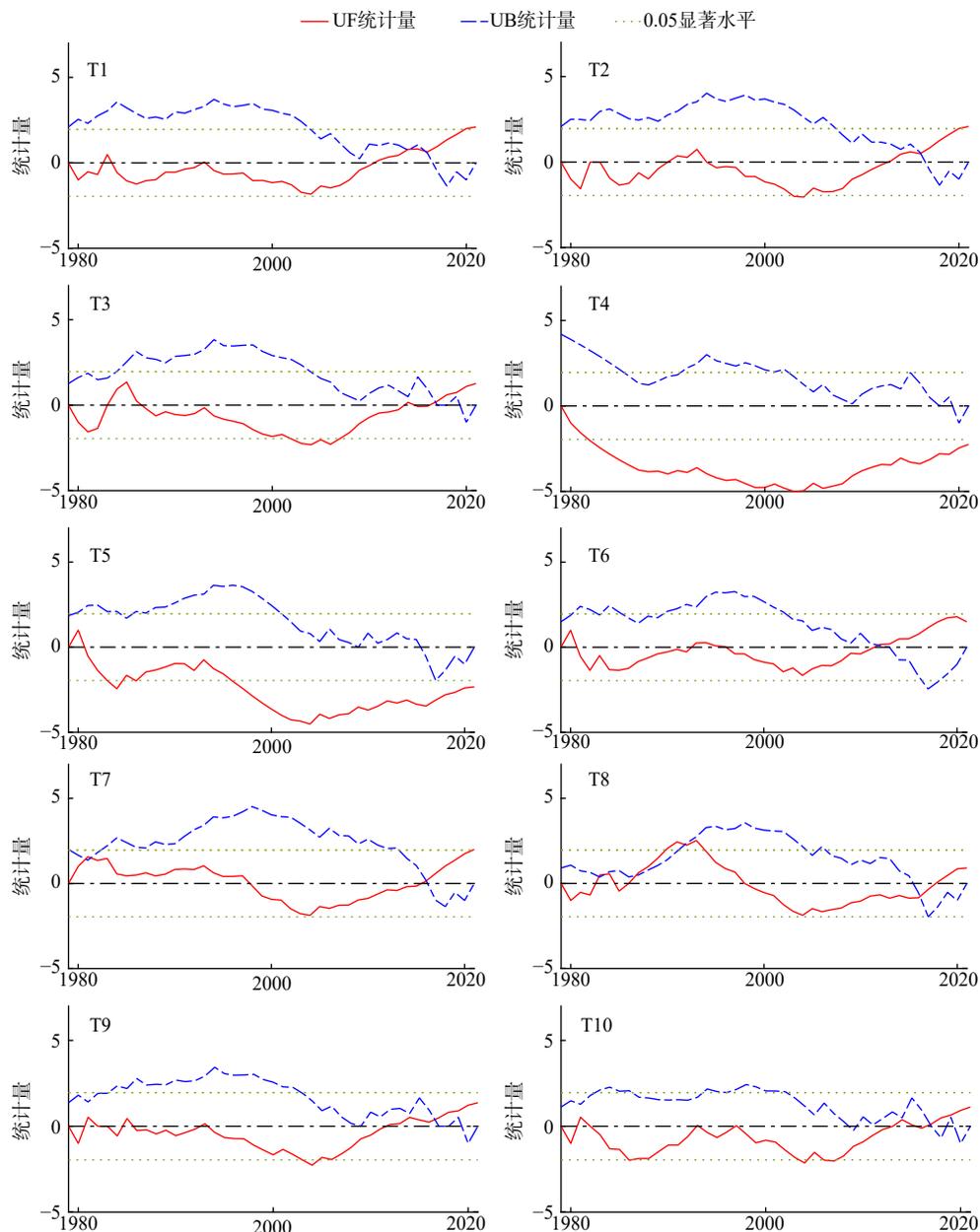


图9 监测点年平均土壤体积分含水量M-K统计量曲线图

Fig. 9 Annual average soil water content M-K statistics curves at the monitoring sites

含水量在 1979—2013 年间除 1990—1994 年间出现上升外,整体呈现下降趋势,2013—2021 年再次呈现上升趋势,突变点发生于 2016 年。长江源西侧唐古拉一带的季节性冻土(T3)在 1983—1987 年和 2016—2021 年间出现上升趋势,其余各时期均呈下降趋势,突变点出现于 2015—2016 年之间;多年冻土(T4)整体呈下降趋势,不存在突变点。东部称多县区域季节性冻土(T5)除在 1980 年出现短暂上升趋势外,整体呈现下降趋势,无突变点;多年冻土(T6)在 1980 年、1992—1995 年和 2012—2021 年呈上升趋势,其余各时期呈现下降趋势,突变点发生于 2012 年。曲麻莱区域季节性冻土(T7)体积含水量在 1998—2016 年间呈下降趋势,其余各时期呈现上升趋势,突变点出现于 2016 年;多年冻土(T8)体积含水量在 1983—1984 年、1986—1998 年和 2018—2021 年呈上升趋势,其余各时期均呈下降趋势,突变点分别出现于 1987、1993、2016 年。雁石坪一带的季节性冻土(T9)体积含水量在 1981 年、1985 年和 2011—2021 年间呈现上升趋势,其余各时期呈下降趋势,突变点出现于 2016—2017 年之间;多年冻土(T10)体积含水量在 1981 年、2012—2015 年和 2017—2021 年呈上升趋势,其余各时期呈下降趋势,突变点介于 2016—2017 年之间。

综上所述分析,在 1979—2021 年间长江源区多年冻土与季节性冻土体积含水量整体上均呈现递增趋势,其中 1979—2016 年间体积含水量相对平稳,动态变化不显著,2016 年后土壤体积含水量多出现突变,呈现急剧上升的趋势。除局部区域外,多年冻土体积分含水量的波动变化程度均呈现大于季节性冻土的特征,有较多的突变点,上升或下降趋势较明显,且多年冻土体积含水量均值较季节性冻土高,其体积含水量年均增加幅度也大于季节性冻土。

多年冻土与季节性冻土体积分含水量的动态差异与其物理特性有关。多年冻土可作为不透水层,阻止土壤水分的下渗,在 7—9 月温度较高的暖季,地表冻土冰及积雪融化成液态水后难以通过多年冻土层下渗,导致水分积聚于地表土壤中,造成地表土壤水分增加,而季节性冻土在暖季融化后可形成透水层,导致多年冻土区的地表土壤体积分含水量相比邻近区域的季节性冻土区域要高;季节性冻土一般沿河床分布,伴随热传递的横向和垂向水分迁移活跃,有助于地表土壤水分的平衡,以至于季节性冻土区的地表土壤体积分含水量变化幅度小于多年冻土,出现的突变点较少。因此,在 7—9 月温度较高的生长季,长江源多

年冻土区的地表土壤保水性较好,更利于植被的生长,而季节性冻土区土壤水分相对稳定,变幅较小,有利于对环境水分变化敏感程度高的植被生长。随着气候变暖,多年冻土会逐渐转化为季节性冻土,且冻土层厚度会逐渐降低^[32],将导致长江源区土壤保水性减弱,制约长江源区生态环境的可持续发展。

5 结论

(1)长江源地表土壤体积分含水量主要集中在 0.15 ~ 0.20 m³/m³ 之间,在 6—10 月处于较高值,由表层到深部主要呈现出增大-减小-稳定特征。

(2)深部土壤水相对表层有明显的滞后趋势,滞后时间一般为 1~2 个月,浅表层土壤体积分含水量受环境影响较大,呈波动起伏状,略有逐渐递增的趋势。

(3)地表土壤体积分含水量整体呈现由东南向西北逐渐递减的趋势;近 40 a 来,地表冻土有逐渐融化的趋势,2000 年后,冻土融化加剧,地表土壤体积分含水量增加明显,尤其冰川发育的西南唐古拉山一带最为显著。

(4)平面上越临近构造断裂带,土壤体积分含水量越低,且随深度增加呈现出一定的加剧趋势。

(5)多年冻土区相比邻近季节性冻土区域的地表土壤体积分含水量高;季节性冻土区的地表土壤体积分含水量波动变化幅度小于多年冻土区。随着气候变暖,多年冻土会逐渐转化为季节性冻土,且冻土层厚度会逐渐降低,将导致长江源土壤保水性减弱,制约长江源生态环境的可持续发展。

参考文献 (References) :

- [1] 陈婷. 长江源区生态水文学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009. [CHEN Ting. Study on ecological hydrology in the headwater region of Changjiang River[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李太兵. 长江源典型多年冻土区小流域径流过程特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009. [LI Taibing. Runoff process in a typical small permafrost watershed at the headwaters of Yangtze River[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 吴小丽. 近30年来青藏高原多年冻土区与季节性冻土区土壤水分变化差异[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020. [WU Xiaoli. Different soil water changes in permafrost and seasonally frozen soil regions on the qinghai-tibetan

- plateau in the last 30 years[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [4] HADDELAND I, HEINKE J, BIEMANS H, et al. Global water resources affected by human interventions and climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(9): 3251 – 3256.
- [5] YANG Kun, YE Baisheng, ZHOU Degang, et al. Response of hydrological cycle to recent climate changes in the Tibetan Plateau[J]. *Climatic Change*, 2011, 109(3/4): 517 – 534.
- [6] COOK B I, BONAN G B, LEVIS S. Soil moisture feedbacks to precipitation in southern Africa[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(17): 4198 – 4206.
- [7] LI Ren, ZHAO Lin, WU Tonghua, et al. The impact of surface energy exchange on the thawing process of active layer over the northern Qinghai-Xizang Plateau, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(6): 2091 – 2099.
- [8] 高佳, 王文科, 赵明, 等. 毛乌素沙地裸地与植被覆盖下非冻结期土壤水分时空分布特征[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(6): 34 – 42. [GAO Jia, WANG Wenke, ZHAO Ming, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of soil moisture in the non-freezing period under the bare land and vegetation cover in the Mu Us desert[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(6): 34 – 42. (in Chinese with English abstract)]
- [9] LIU Tianwen, HU Cheng, WANG Qing, et al. Conversion relationship of rainfall-soil moisture-groundwater in Quaternary thick cohesive soil in Jiangnan Plain, Hubei Province, China[J]. *China Geology*, 2020, 3: 462 – 472.
- [10] ZHU Liang, YANG Mingnan, LIU Jingtao, et al. Evolution of the freeze-thaw cycles in the source region of the Yellow River under the influence of climate change and its hydrological effects[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2022, 10(4): 322 – 334.
- [11] 卞建民, 刘彩虹, 杨晓舟. 吉林西部大安灌区土壤贮水能力空间变异特征及土壤水分有效性[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(2): 554 – 563. [BIAN Jianmin, LIU Caihong, YANG Xiaozhou. Spatial distribution of soil water storage capacity and soil water availability in west Jilin Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2017, 47(2): 554 – 563. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 张超, 王会肖. 土壤水分研究进展及简要评述[J]. *干旱地区农业研究*, 2003, 21(4): 117 – 120. [ZHANG Chao, WANG Huixiao. A brief review of advances in soil water research[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(4): 117 – 120. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 杨丽萍, 苏志强, 侯成磊, 等. 基于随机森林的干旱区全极化SAR土壤含水量反演[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(4): 1255 – 1264. [YANG Liping, SU Zhiqiang, HOU Chenglei, et al. Soil moisture content retrieval in arid area based on random forest using polarimetric SAR data[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(4): 1255 – 1264. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 胡顺, 凌抗, 王俊友, 等. 西北典型内陆流域地下水与湿地生态系统协同演化机制[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(5): 22 – 31. [HU Shun, LING Kang, WANG Junyou, et al. Co-evolution mechanism of groundwater and wetland ecosystem in a typical inland watershed in northwest China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(5): 22 – 31. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 田晴, 陆建忠, 陈晓玲, 等. 基于长时序CCI土壤湿度数据的长江流域农业干旱时空演变[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(2): 472 – 481. [TIAN Qing, LU Jianzhong, CHEN Xiaoling, et al. Spatio-temporal evolution of agricultural drought in the Yangtze River Basin based on long-term CCI soil moisture data[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(2): 472 – 481. (in Chinese with English abstract)]
- [16] ZENG Jiangyuan, LI Zhen, CHEN Quan, et al. Evaluation of remotely sensed and reanalysis soil moisture products over the Tibetan Plateau using in situ observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 163: 91 – 110.
- [17] 刘强, 杜今阳, 施建成, 等. 青藏高原表层土壤湿度遥感反演及其空间分布和多年变化趋势分析[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(10): 1677 – 1690. [LIU Qiang, DU Jinyang, SHI Jiancheng, et al. Remote sensing inversion of surface soil moisture in Qinghai-Tibet Plateau and its spatial distribution and multi-year variation trend analysis[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2013, 43(10): 1677 – 1690. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 万国宁, 杨梅学, 王学佳, 等. 青藏高原中部BJ站土壤湿度不同时间尺度的变化[J]. *土壤通报*, 2012, 43(2): 286 – 293. [WAN Guoning, YANG Meixue, WANG Xuejia, et al. Variations in soil moisture at different time scales of BJ site on the central Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(2): 286 – 293. (in

- Chinese with English abstract]
- [19] 石磊, 杜军, 周刊社, 等. 1980—2012年青藏高原土壤湿度时空演变特征[J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1241 – 1248. [SHI Lei, DU Jun, ZHOU Kanshe, et al. The temporal-spatial variations of soil moisture over the Tibetan Plateau during 1980-2012[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(5): 1241 – 1248. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 卓嘎, 德吉卓玛, 尼玛吉. 青藏高原土壤湿度分布特征及其对长江中下游6、7月降水的影响[J]. 高原气象, 2017, 36(3): 657 – 666. [ZHUOGA, DEJIZHUOMA, NI Maji. Distribution of soil moisture over the qinghaitibetan plateau and its effect on the precipitation in June and July over the mid-lower reaches of Yangtze River Basin[J]. *Plateau Meteorology*, 2017, 36(3): 657 – 666. (in Chinese with English abstract)]
- [21] CROW W T, HUFFMAN G J, BINDLISH R, et al. Improving satellite-based rainfall accumulation estimates using spaceborne surface soil moisture retrievals[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2009, 10(1): 199 – 212.
- [22] GOYAL R K. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: A case study of arid zone of Rajasthan (India) [J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 69(1): 1 – 11.
- [23] 李元寿, 王根绪, 赵林, 等. 青藏高原多年冻土活动层土壤水分对高寒草甸覆盖变化的响应[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 157 – 165. [LI Yuanshou, WANG Genxu, ZHAO Lin, et al. Response of soil moisture in the permafrost active layer to the change of alpine meadow coverage on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(1): 157 – 165. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 钱开铸. 长江源区水文周期特征及其对气候变化的响应[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013. [QIAN Kaizhu. Hydrological periods and its responses to climate change in the source region of Yangtze River, China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [25] ZHAO Lin, ZOU Defu, HU Guojie, et al. A synthesis dataset of permafrost thermal state for the Qinghai-Tibet (Xizang) Plateau, China[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 4207 – 4218.
- [26] ZOU Defu, ZHAO Lin, SHENG Yu, et al. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau[J]. *The Cryosphere*, 2017, 11(6): 2527 – 2542.
- [27] DORIGO W, WAGNER W, ALBERGEL C, et al. 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.
- [28] AN Ru, ZHANG Ling, WANG Zhe, et al. Validation of the ESA CCI soil moisture product in China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 48: 28 – 36.
- [29] 黄荟羽, 李恩键, 安娟, 等. 克拉默法与曼-肯德尔法对降水突变检验的对比分析[J]. 现代农业科技, 2018(8): 184 – 185. [HUANG Huiyu, LI Enjian, AN Juan, et al. Comparative analysis of kramer method and Mann-Kendall method for sudden change test of precipitation[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2018(8): 184 – 185. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 陈喜, 黄日超, 黄峰, 等. 西北内陆河流域水循环和生态演变与功能保障机制研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 12 – 21. [CHEN Xi, HUANG Richao, HUANG Feng, et al. A comprehensive study of the maintaining mechanisms for hydrological cycle and ecological evolution and function in the northwest inland river basins of China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(5): 12 – 21. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 闫柏琨, 李文鹏, 甘甫平, 等. 基于地表水循环遥感观测的黑河流域水平衡分析[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 44 – 56. [YAN Bokun, LI Wenpeng, GAN Fuping, et al. Water balance analysis based on remote sensing observation of surface water cycle in the Heihe River watershed[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(3): 44 – 56. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 崔赢, 沈宇鹏, 张中琼. 环境因素对兴-贝型多年冻土分布与发育的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1427 – 1440. [CUI Ying, SHEN Yupeng, ZHANG Zhongqiong. Influence of environmental factors on distribution and development of Xing'an-Baikal permafrost[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(5): 1427 – 1440. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳