

引用格式: Wang Xueqin, Zhang Xiang, Chen Nengcheng, *et al.* Design of Soil Moisture Network based on Temporal and Spatial Variability[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(6): 1437–1446. [王雪琴, 张翔, 陈能成, 等. 基于时空变异性的土壤水分观测网设计[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(6): 1437–1446.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.6.1437

基于时空变异性的土壤水分观测网设计

王雪琴¹, 张翔^{1,2}, 陈能成^{1,2}, 马宏亮¹

(1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079;

2. 中国地质大学(武汉) 国家地理信息系统工程技术研究中心 地理与信息工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:合理有效的土壤水分观测网能更好地监测土壤水分原位数据, 并提供高精度的土壤水分信息。通过对武汉“1+8”城市圈 2010—2019 年土壤水分的时空变异性进行分析, 并叠加现有站点分布情况和土地利用类型数据, 对研究区域进行了两次分区, 设计了一种基于时空变异性的土壤水分观测网优化布局方法。设计的观测网在已有的 24 个站点基础上, 新增了 79 个站点, 使现有单点控制面积下降到符合国家规范要求的 381—792 km² 之间, 同时单点代表性相较于布设前平均提升了 71.57%。该方法遵循了“先分区后布设”的思想, 先利用空间相对连续的卫星遥感数据获取区域土壤水分地理规律, 再推导地面站网的布局方案, 可以为相关站网的优化布设提供一种新的参考。

关键词: TVDI; 土壤水分; 时空变异性; 分区优化; 观测网布设

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)06-1437-10

1 引言

土壤水分是气候、农业、水文、生态等领域研究的重要参数^[1], 区域土壤水分的准确观测可用于指导农业生产, 监测干旱进程, 以及实现水土资源的可持续利用^[2]。在实际应用中, 区域土壤水分的监测方法有两种, 一种是使用遥感数据产品, 另一种是使用地面观测站点^[3]。遥感数据能够以相对方便和快捷的方式在大尺度地理区域内获取最新的信息, 在土壤水分中的应用也越来越多。但当前遥感手段尤其是被动微波遥感会受分辨率和地理条件的制约, 且相关验证研究表明这些产品数据存在一定的不确定性^[4-7]。相较而言, 土壤水分的原位站点观测能够提供高频次、长时序及高精度的站点资料与数据, 不仅能为小尺度研究提供数据来源, 也能为大中尺度即遥感手段监测土壤水分研究提供定

标和精度验证依据^[8], 因此仍然是土壤水分感知研究和应用中不可忽视的重要手段。

国际土壤水分观测网(International Soil Moisture Network, ISMN)是全球最大的地面土壤水分共享数据库^[9], 目前(截止到 2021 年中旬)全球已有超过 70 个地面土壤水分观测网络加入到 ISMN, 但中国的大部分区域仍无可用的观测数据。而自 2009 年起, 我国国家气象局就开始建设土壤水分自动观测台站, 初步形成了全国土壤水分自动观测网。但随着时间的推移, 现有观测网逐渐无法满足区域土壤水分高精度和多尺度感知的需求, 主要体现在以下两个方面: 一方面, 现有站点布设主要依据场地的可用性, 较少从区域地理要素本身属性的变化特征出发; 另一方面, 随着研究尺度的精细化, 现有站点布设密度已不能满足区域土壤水分感知尺度的需求, 经常需要靠人工野外采集来获取充足

收稿日期: 2021-09-20; 修订日期: 2022-10-22

基金项目: 国家重点研发计划项目“城市多尺度综合感知技术与体系”(2018YFB2100500), 国家自然科学基金项目“基于星地多源数据的干旱演变过程连续监测与定量分析方法研究”(41801339)。

作者简介: 王雪琴(1997—), 女, 湖北广水人, 硕士研究生, 主要从事土壤水分感知研究。E-mail: wangxueqin@whu.edu.cn

通讯作者: 张翔(1989—), 男, 湖北孝感人, 教授, 主要从事时空融合和干旱灾害研究。E-mail: zhangxiang76@cug.edu.cn

的数据,耗时费力,给相关研究带来了困难。因此现阶段亟需加大土壤水分站点的布设密度。与此同时,无线土壤湿度传感器网络技术也正逐步成熟^[10-11],可以近实时地观测土壤水分的时空变化,并可以弥补局部和区域尺度测量(例如遥感)之间的差距^[12-13],因此用其代替传统土壤水分观测站是较好的选择。但其中的关键在于,土壤水分观测网必须尽可能地降低成本,同时又不过分损失感知精度。因此,观测点位的合理布设将是本文的研究重点。

现有的布设方法大多通过各种算法,基于不同优化准则得到点集的最优解^[14-16],即“先建设后纳入”模式。但这些方法并未考虑到区域本身存在的空间差异,将区域看作同一的整体。因此,研究从遥感监测的土壤水分数据出发,挖掘变量本身存在的时空特性并对区域进行分区,在不同分区的基础上得到适合本区域的站点布设方案。基于不同变量的遥感观测数据和现有观测站点分布情况,对区域土壤水分的时空变异性进行研究,进而对区域进行单元划分,为区域新增感知站点及其合理布设提供一种新的依据。研究回答了如何合理布设土壤水分传感器的问题,设计了符合研究区的观测站网,对合理高效地观测区域土壤水分,进而服务科研应用有着重要的意义。

2 数据与研究区

2.1 研究区概况

武汉“1+8”城市圈以武汉为圆心,囊括黄石、

鄂州、黄冈、孝感、咸宁、仙桃、天门和潜江周边8个城市,总占地面积约5.78万 km²,人口密集。它位于长江中游、江汉平原中东部,地理位置及自然条件优越,是我国中部最具发展潜力和活力的地区。区域土地利用类型丰富,由内向外呈现出环状分布;地形地貌类型多样,平原、丘陵、山地等兼备。

武汉“1+8”城市圈属于亚热带季风气候,降雨多集中在春夏两季,每逢梅雨长、雨量大时,易形成洪涝灾害。而在梅雨期过后,伏旱也时有发生。因此,武汉“1+8”城市圈土壤水分的精细化观测,对区域旱涝灾害监测和水资源的可持续发展具有参考价值与意义。当前,研究区现有站点数为32个(图1),密度较为稀疏,站点布设不够合理,如中心城市(武汉市)仅有2个站点,很多区县甚至没有观测站点。因此,在该区域如何部署新的土壤水分观测站网,是一个非常关键的问题。

2.2 数据获取及预处理

2.2.1 遥感数据

地表温度(LST, Land Surface Temperature)数据来自美国国家航空宇宙局(NASA)的MODIS标准产品数据(<https://earthdata.nasa.gov/>),采用每8 d合成的空间分辨率为1 km的MOD11A2地表温度数据,按照经纬度范围批量下载区域2010—2019年数据共1 840幅。利用官方提供的MRT处理工具对数据进行数据拼接、图形裁剪、投影转换、几何校正,并依据日期将每8 d合成的地表温度数据采用最大值合成法得到区域月尺度上以摄氏度为单位的LST数据。

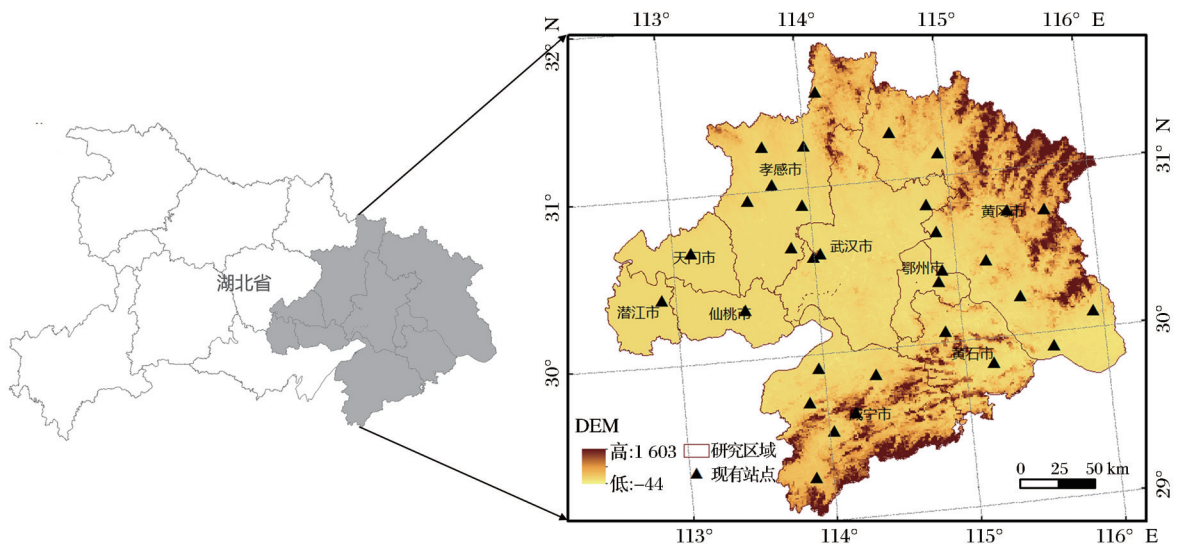


图1 研究区位置及现有站点空间分布

Fig.1 Location of the study area and spatial distribution of the existing stations

植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)数据来自于中科院资源环境科学与数据中心生产的中国月度植被指数空间分布数据集^[17]。该数据集基于SPOT卫星遥感数据,采用最大值合成法生成,研究下载了1 km分辨率下的数据,并经过重投影、裁剪得到区域2010—2019年月尺度上的NDVI数据。

2.2.2 气象站点信息

研究中的气象站点信息来自中国气象数据共享网站(<http://data.cma.cn/>),站点监测属性包括土壤水分数据,站点分布如图1所示。主要依据网站提供的中国地面气象要素观测资料台站表,获取研究区内各站点经纬度信息,并进行矢量化处理,明确研究区现有站点分布情况,为后续站点布设提供基础参考信息。

2.2.3 辅助数据

DEM数据来源于中科院资源环境科学与数据

中心(<https://www.resdc.cn/>),使用2015年生成的数据产品,该数据集基于最新的SRTM V4.1数据经重采样生成,数据采用WGS84椭球投影。选择全国1 km的DEM数据作为数据源,经过裁剪、重采样后得到区域所需高程数据。

土地利用类型数据来源于中科院资源环境科学与数据中心,暂无每年数据,因此使用2018年生成的1 km数据产品为例进行研究。该数据以Landsat遥感影像数据为源,通过人工目视解译获取。

3 研究方法

3.1 研究路线

如图2所示,基于对区域土地利用类型、现有气象站点和区域土壤水分空间变异性的研究,将区域地理区划与属性区划进行叠置分析,得到适合本研究区的综合功能区划图。在此基础上结合属性的时间变异性进行定量分析,为站点布设提供依据,进而建立完整且较优的土壤水分观测网。

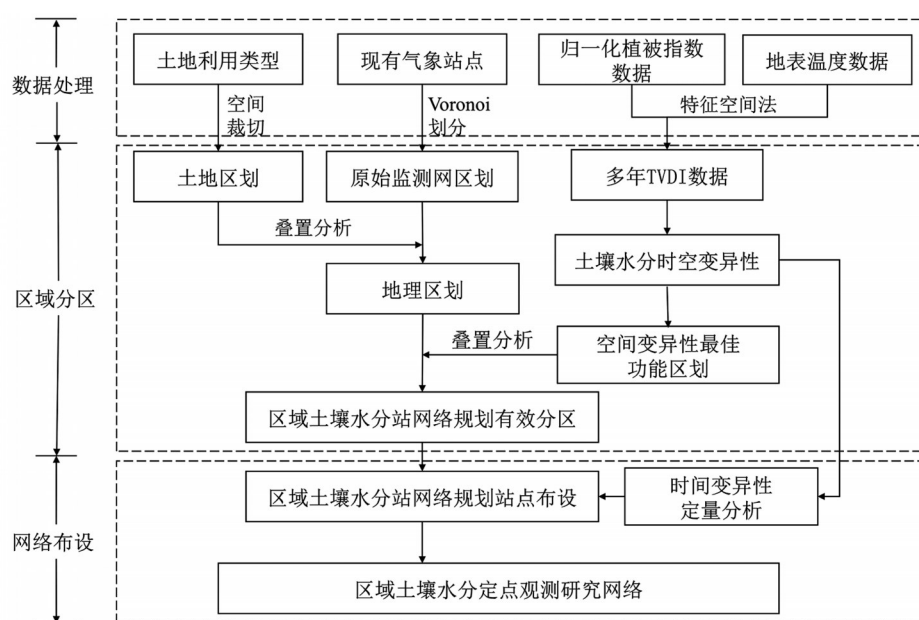


图2 技术流程图

Fig.2 Technique flow chart

3.2 TVDI计算

温度植被干旱指数(Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI)最早由Sandholt等^[18]提出,是一种基于NDVI-LST特征空间的土壤水分观测方法。相较于其他方法,TVDI的物理意义明确,能够提供更加准确、丰富的土壤水分信息,是相关研究中使用最广的遥感干旱指数之一。由于研究区遥感土壤水分产品分辨率不足,站点实际测量数据稀

少,而相关研究已证明中国区域TVDI指数与土壤水分具有良好的负相关性^[19-20],因此本文中用TVDI指数表征土壤水分数据进行后续的研究,计算流程如图3所示。TVDI计算公式如下:

$$TVDI = \frac{LST_i - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}} \quad (1)$$

其中: LST_i 为相同NDVI值对应的任意像元地表温度; LST_{min} 为相同NDVI值对应的最小地表温度;

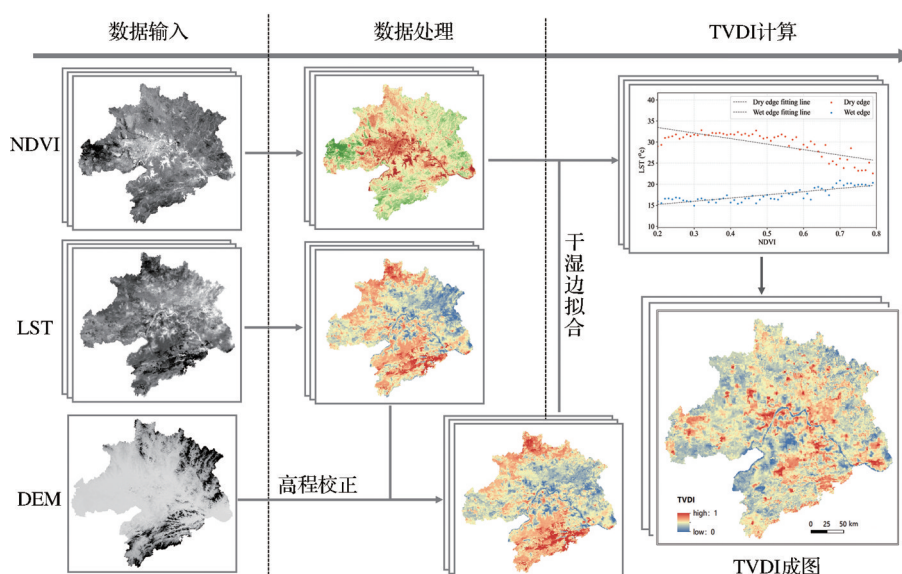


图3 TVDI计算与成图

Fig.3 TVDI calculation and mapping

LST_{max} 为相同 NDVI 值对应的最大地表温度。

由于研究区地形会对 TVDI 计算结果造成影响,因此引入高程数据对 LST 数据进行校正^[21],剔除高程因子产生的影响,得到更符合本研究区的结果。地表温度校正公式如下:

$$LST' = LST + a * DEM \quad (2)$$

其中: LST 为原始地表温度数据; DEM 为高程数据; LST' 为校正后的地表温度数据; a 为校正系数,参考已有研究,取其值为 $0.006 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ^[22]。

3.3 时空变异性计算

Vachaud 等^[23]于 1985 年提出了时空持久性的概念,随后该概念逐渐被用于土壤水分的时空分析中。本研究以年为单位,通过计算不同月份每个 TVDI 网格的均方根误差 (RMSE, Root Mean Square Error),包括时间均方根误差 (tRMSE) 和空间均方根误差 (sRMSE),来定量分析土壤水分的时空变化^[24]。时间均方根误差的值越小 (越接近 0),说明该栅格单元的土壤水分时间变化越不明显;反之说明随时间变化比较强烈。空间均方根误差计算结果值越大 (越接近 1),表明其变化与研究区域平均状况越不同;反之说明其与同一时期内区域的土壤水分平均状况具有一致性。具体计算步骤如下:

首先,计算每一期栅格影像数据的空间平均值:

$$\overline{TV}_{s,m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n TV_{i,m} \quad (3)$$

其中: $\overline{TV}_{s,m}$ 为第 m 期 (一共有 12 期) 影像中所有栅

格单元的平均值; n 为栅格单元总数; $TV_{i,m}$ 为第 m 期影像中某一栅格单元的值。

多期影像中同一栅格单元土壤水分的时间平均值,计算如下:

$$\overline{TV}_{t,i} = \frac{1}{N_m} \sum_{m=1}^{N_m} TV_{i,m} \quad (4)$$

其中: $\overline{TV}_{t,i}$ 为多期栅格数据的时间平均值; N_m 表示处理的影像数量 (本研究中为 12), $TV_{i,m}$ 为第 m 期影像中某一栅格单元的值。

其次,计算某一栅格单元值和平均值的差异,即平均相对差值 $\bar{\delta}$:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} \frac{TV_{i,t} - \overline{TV}^*}{\overline{TV}^*} \quad (5)$$

其中: \overline{TV}^* 对应 (3)、(4) 两个公式计算的空间平均值 (\overline{TV}_s) 和时间平均值 (\overline{TV}_t)。

接着,计算相对差值的方差如下:

$$\sigma(\delta)^2 = \frac{1}{N_m - 1} \sum_{i=1}^{N_m} \left(\frac{TV_{i,t} - \overline{TV}^*}{\overline{TV}^*} - \bar{\delta} \right)^2 \quad (6)$$

最后,相对差值的均方根误差计算如下,得到描述土壤水分波动性程度的时空均方根误差:

$$RMSE = (\bar{\delta}^2 + \sigma(\delta)^2)^{1/2} \quad (7)$$

其中: $\bar{\delta}$ 为平均相对差值, $\sigma(\delta)$ 为相对差值的方差。

3.4 分区单元划分

为了得到适合本研究区的土壤水分观测分区,必须制定合适的分区标准,得到每个分区单元内所有要素尽可能相似但各个分区单元之间尽可能不同的相对最优解。对分区单元的划分进行如下的

设计:

(1)原始分区单元划分。Voronoi图是常用的空间分割方法,可以确定地理实体的边界。其原理是以地理空间实体为生长目标,按距离最短原则,将连续空间划为若干个分区。得到的每个分区内的空间点到该空间生长点的距离都小于到其它生长点的距离,因此该方法常被用来划分地理要素的影响范围。本研究选用该方法,以区域现有站点为基础,通过Voronoi图得到区域原始的分区,将其作为区域原始的观测网。

(2)基于区域地理属性特征进行一次分区单元划分。不同土地利用类型具有不同的土壤属性和土壤水分时空变化特征,需要分开管理和观测。因此,在原始分区上叠加土地利用类型数据,对原始分区进行一次分区的划分。

(3)基于区域变量的空间属性进行二次分区单元划分。区域土壤水分的空间变异性作为已被研究的先验知识,具有很强的区域特性,不同的变异程度需分区监测,因此依据其等级进行分区的二次调整。具体步骤如下:基于研究区多年的土壤水分空间变异性结果,对区域土壤水分进行分组分析,基于K均值算法得到的伪F统计量的值来衡量分组的有效性。其中,伪F统计量是一个反映组内相似性和组间差异性的比率,其值越大,表明分组结果越好。再基于分组数生成区域土壤水分空间变异性的聚类结果,叠加一次划分结果进行二次分区的划分。

3.5 观测站位置确定

观测站网布设的最后一步是观测站位置的确定,它们是观测网的组成核心,要能较好地反映研究区土壤水分的时空变化。观测站点位置确定步骤如下:

(1)保证对区域的全面感知。以上述分区单元为基本单元,保证每个分区单元内布设一个站点。

(2)选择的位置要有代表性,以保证布设站网的最优。研究区属性的平均相对差($\bar{\delta}_i$)和相对差的标准差($\sigma(\delta_i)$)常被用来确定区域土壤水分的代表位置,通常选择 $\bar{\delta}_i$ 接近零、 $\sigma(\delta_i)$ 较低的位置^[25],该位置具有很好的稳定性,可以用来监测和评估区域土壤水分变化。为了在 $\bar{\delta}_i$ 和 $\sigma(\delta_i)$ 之间做出权衡,引入时间均方根误差来进行评估^[26],具体参见章节2.2中的介绍。基于计算结果,每个分区单元内具有最低tRMSE值的位置被确定为传感器的布设点。

(3)观测站点应该统一规划,避免重复布置。应结合实际情况,充分考虑已布设的国家监测站点,将新增的观测站与现有的站点进行叠加分析,删去与现有站点距离太近的新增站点,避免重复性观测,减少布设成本。

4 结果与分析

4.1 TVDI计算

基于月尺度的TVDI和LST数据,进行干湿边拟合和TVDI的计算生成,得到区域2010—2019年每月的栅格数据,分辨率为1 km。其中,月尺度地表温度数据采用最大值合成法得到,保证与NDVI数据处理方式相同,同时也保证数据的完整性。对特征空间干湿边拟合时,NDVI的取值为0.2—0.8,保证对植被检测的有效性和灵敏度^[27]。结果显示,在该区间内对NDVI和LST形成的点集进行干湿边线性拟合时重合度较高。

4.2 时空变异性

2010—2019年研究区tRMSE计算结果如图4所示。从多年的结果来看,区域时间均方根误差的平均值在0.3附近波动,土壤水分随时间变化不太明显。整体来看,研究区土壤水分季节变化明显的区域(主要分布在天门市、潜江市和黄冈市)面积小且分布较散,绝大部分区域的季节性变化很小。

2010—2019年研究区sRMSE计算结果如图5所示。从多年的结果来看,区域空间均方根误差的平均值分布在0.4—0.7之间,分布差异较为明显。整体来看,潜江、黄石、孝感市的波动较大,与研究区整体存在差异;鄂州、仙桃、武汉市的波动较小,与研究区平均土壤水分状况较为一致。

表层土壤水分的变化受降水、地形、植被等因素的综合影响。其中时间变异性主要受降水影响,若季节性降水起伏不大,或区域河网、湖泊密集,土壤水分含量高,其波动性就会相对不明显。而空间变异性受区域地理特性影响较大,如地形地貌、土壤类型、植被覆盖等,会使土壤水分的空间格局产生局部变化。

4.3 分区单元划分

4.3.1 原始分区单元

地方站网的布设,应在充分考虑已布设的国家站基础上进行。基于现有的32个气象站点,对区域进行Voronoi多边形划分,作为区域初始分区单元,如图6(b)中的灰色区域所示。依据分区结果,对分

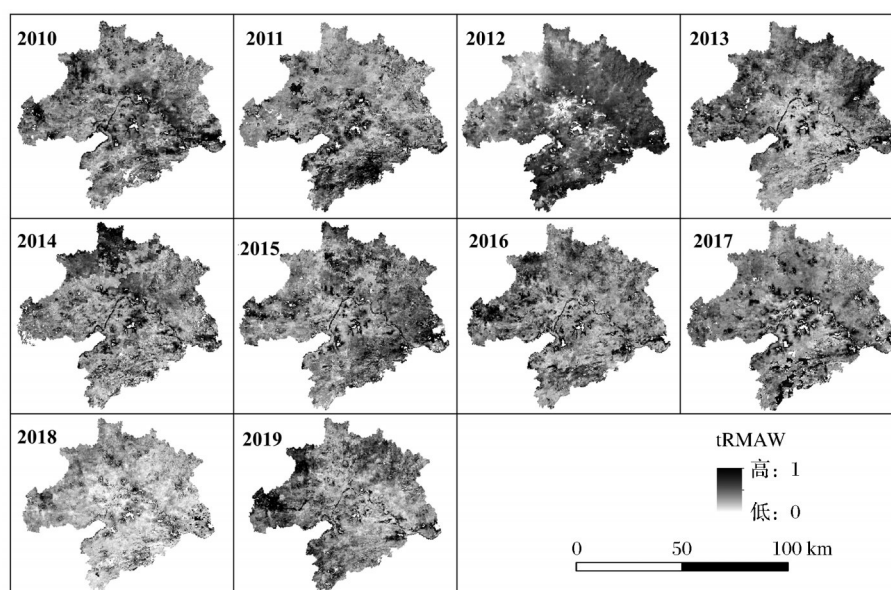


图 4 2010—2019年研究区土壤水分时间均方根误差分布

Fig.4 tRMSE distribution of soil moisture in the study area from 2010 to 2019

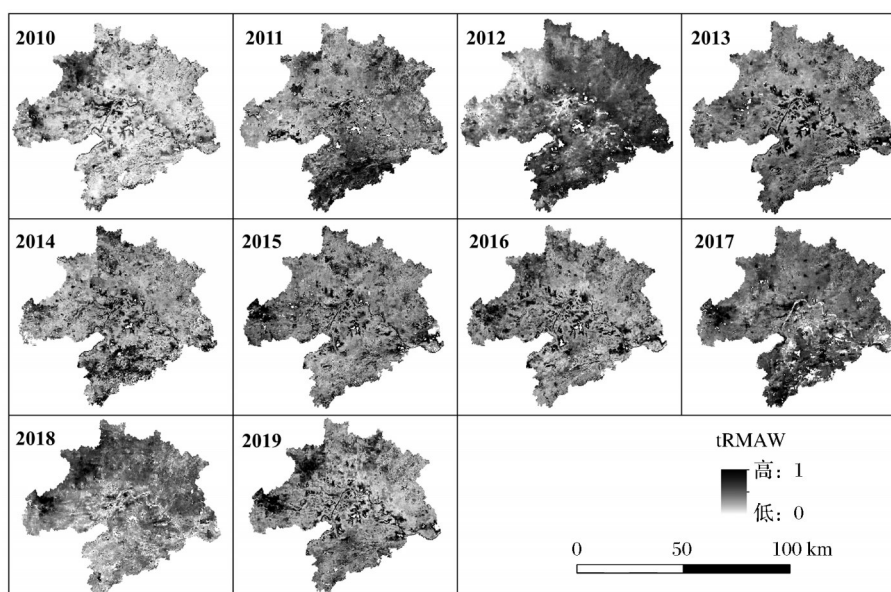


图 5 2010—2019年研究区土壤水分空间均方根误差分布图

Fig.5 sRMSE distribution of soil moisture in the study area from 2010 to 2019

区进行面积统计,得到现有站点的单点监测面积在 1 336—3 228 km²之间,监测面积过大,代表性不足,难以准确反映区域土壤水分的时空特征。

4.3.2 一次分区

将武汉“1+8”城市圈土地利用类型按照一级类别归并,如下图6(a)所示,包含耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地五种类型,其中耕地和林地占区域的绝大部分面积,且有较为明显的边界。基于不同土地利用类型,在原始分区上,划分新的边界,得到新增的 16 个分区单元,如图 6(b)中

的黄色区域所示。

4.3.3 二次调整

在一次分区基础上,以 2010—2019 年的土壤水分空间均方根误差结果为输入变量,进行聚类分析,计算当聚类类别数分别为 2—12 时对应的伪 F 统计量。结果表明,随着聚类数的增加,伪 F 统计量的值呈现上升趋势,且上升率呈现先增后减的趋势。当聚类数由 5 增加到 6 时,其增加率达到最大为 19%。由以上结果可知,当聚类数大于 6 时,聚类效果并不能得到大幅度的提升。因此选择最佳聚

类数为6,得到区域分类情况如下图7(a)所示,可以看出研究区分区较为明显。叠加聚类结果,对区域

进行二次分区调整,得到新增分区46个,如下图7(b)所示。

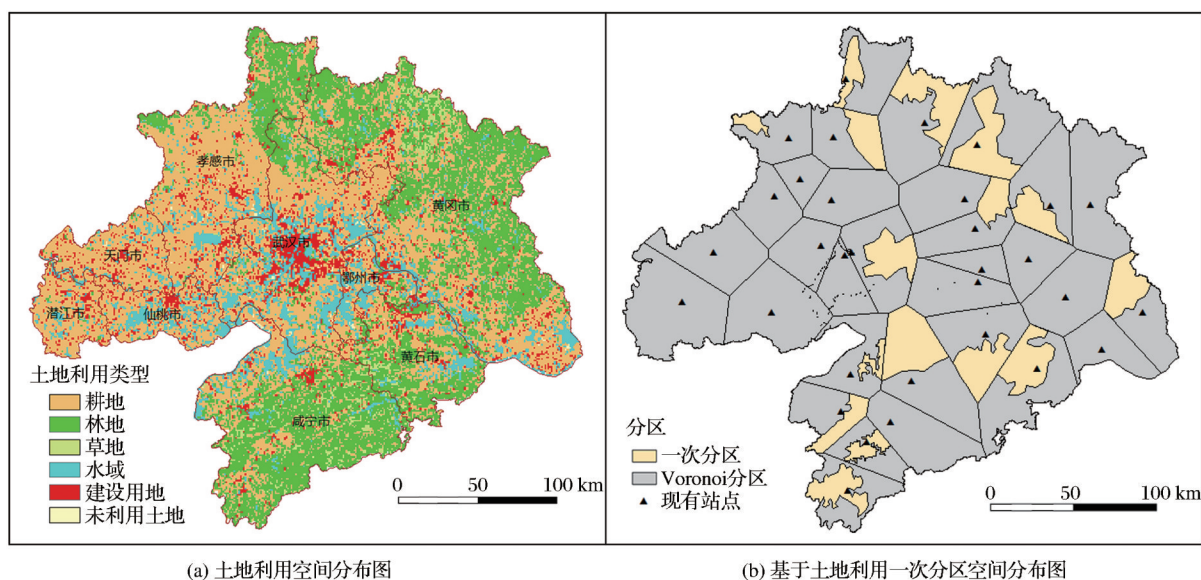


图6 研究区空间分布图

Fig.6 Spatial distribution map of

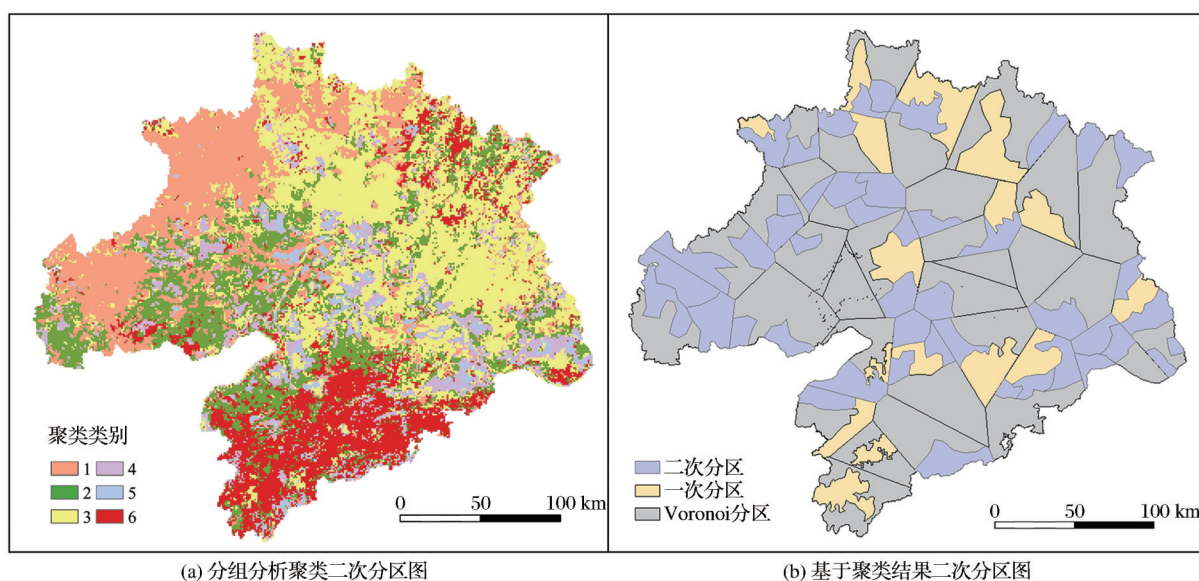


图7 研究区二次分区图

Fig.7 Clustering results of study area

4.4 传感器布设

基于2010—2019年的TVDI时间均方根误差结果,以其平均值代表近十年的整体情况,更具有普遍性。将每个区域内时间均方根误差值最小的点,作为拟布设传感器的位置。同时叠加原始站点进行调整,即同一分区内,若新增传感器位置距离现有站点位置较近,表明该区域现有观测站点布设合理,则删去该样点,用现有站点替代。

结果确定了94个分区的传感器最佳布设位置,

其中的15个站点位置与现有站点位置较为接近,删去对应区域的传感器布设点后,最终一共增设79个传感器,得到区域传感器布设位置图和分布情况如图8所示。

4.5 结果评价

参照国家墒情站对墒情站网最低布设密度做的规定^[28]:平原区单站控制耕作面积300—900 km²。按照行政区划计算原始站网密度和本研究设计的站网密度(表1),前者在1 582—2 856 km²/站之间,

后者范围在 381—792 km²/站之间,单点代表性(即监测面积)相较于布设前平均提升了 71.57%。一方面,按照耕地土壤水分监测的标准进行评价,设计的站网很好地满足了要求。另一方面,时间变异性保证了每个分区单元的站点布设位置均为最佳,且空间变异性较大的几个市(黄石、孝感、潜江)对应的站网密度都较小,也更加符合本区域实际情况,具有可靠性。

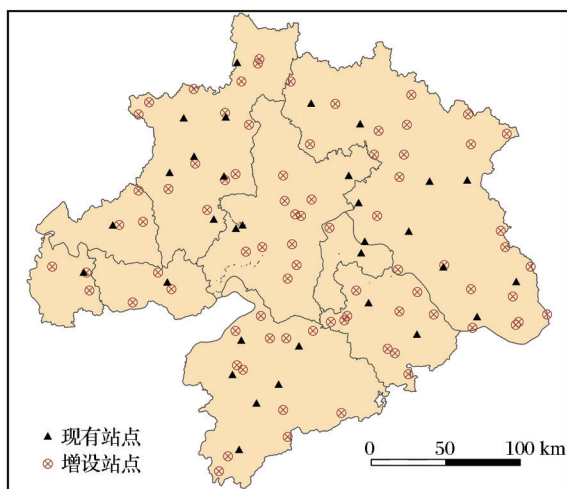


图 8 区域土壤水分观测网布设图

Fig.8 Layout of regional soil moisture network

表 1 各市站点布设情况统计

Table1 Statistics on the layout of stations in each city

地级市	现有站点	新增站点	原始站网密度 (km ² /站)	设计站网密度 (km ² /站)
孝感市	7	13	1 270.77	444.77
黄冈市	10	24	1 232.54	513.56
天门市	1	3	2 615.88	653.97
武汉市	3	10	2 855.67	659.00
鄂州市	1	1	1 582.66	791.33
潜江市	1	3	2 002.91	500.73
仙桃市	1	3	2 518.60	629.65
黄石市	2	10	2 289.90	381.65
咸宁市	6	12	1 624.35	541.45

5 讨 论

5.1 观测网分析

以武汉“1+8”城市圈为代表,对其土壤水分原位观测站网做了代表性分析与优化布局。首先结合区域已有站点和地理属性进行一次规划分区,再结合区域特定属性的时空变化特征进行二次规划分区,最后依据规划分区进行土壤水分观测站网的建设。该流程更能体现出观测网规划的有序性和

整体性,也更加具有针对性。同时,区域分区和土壤水分传感器具体位置的确定可根据不同地区的实际地理特征和功能区划进行布设。

与已有观测网建设基本遵循的“先建设后纳入”模式不同,研究遵循“先分区后建设”的模式。使用这种布设模式的有中国森林生态系统定位观测研究网络和美国生态观测网络,区别在于前者主要是对植被、温度等区划数据进行空间叠置得到分区,后者主要基于算法对气候变量数据集进行区域聚类得到分区。本研究中的观测网络在尺度上进行了细化,在方法上既对属性数据进行了聚类分区也加入了辅助数据进行叠置分区,为市域范围的土壤水分观测网设计提供参考。

5.2 观测网的局限性

将 GIS 技术应用到土壤水分原位观测研究网络的建设中,在空间尺度上不仅可以直观展示网络布设结果,而且可以对其进行空间分析和综合分析。但也存在一定的局限性与不足:一方面,在数据方面存在一定的局限性。区域长时间土壤水分实测数据难以获取,缺少实测数据加以验证。另一方面,缺乏对站网实际布设工作的探讨。由于未对实地进行调研,无法确定新增站点的位置是否适合布设传感器,因此在具体实现时还需依据待观测区域的具体环境进行位置调整。

尽管观测网络在规划上存在一定的不足,但本文的方法与流程存在推广的价值,也能够为其他区域土壤水分地面观测网的建设提供参考。

6 结 论

研究利用 DEM 校正的 TVDI 对武汉“1+8”城市圈多年的土壤水分时空变异性进行了研究,设计了区域土壤水分观测网,解决了区域现有站点数量少及代表性不足的问题,并得出以下结论:

(1)研究区整体土壤水分时间变异性较小,黄石、孝感、潜江市土壤水分空间变异性较大,空间分布与整体存在差异,中部则保持了较好的一致性。

(2)利用 K 均值算法得到区域土壤水分空间均方根误差的最佳聚类数为 6,并叠加多图层数据将区域划为了 94 个有效分区单元,保证了单个分区单元内部的统一性及不同分区单元之间的差异性。

(3)基于土壤水分时间均方根误差结果,确定了每个分区的最佳站点布设位置。在已有的 24 个气象站点基础上,新增了 79 个土壤水分传感器,使

得单个站点监测区域面积下降到 381—792 km² 之间,得到了符合各区域变异性的站网密度大小结果。

通过对研究区域土壤水分观测站网的规划布局和方法应用,以期为区域土壤水分站点布设提供依据,也为其它地区的土壤水分观测站网规划布局提供参考,使得土壤水分站网规划更加科学合理和更具代表性。

参考文献 (references):

- [1] Liu Qinhuo, Xin Jingfeng, Xin Xiaozhou, *et al.* Remote sensing monitoring of agricultural drought based on land surface temperature and vegetation index[J]. *Science & Technology Review*, 2007, 25(6): 12-18.[柳钦火, 辛景峰, 辛晓洲, 等. 基于地表温度和植被指数的农业干旱遥感监测方法[J]. *科技导报*, 2007, 25(6):12-18.]
- [2] Chen Shaodan, Zhang Liping, Shan Lijie, *et al.* Remote sensing retrieval of soil moisture in the middle and lower reaches of the Yangtze River and analysis of its influencing factors[J]. *Journal of Applied Basic and Engineering Science*, 2017, 25(4): 657-669.[陈少丹, 张利平, 闪丽洁, 等. 长江中下游流域土壤湿度遥感反演研究及其影响因素分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2017, 25(4):657-669.]
- [3] Huang Yan, Zheng Wei. Design of forest ecosystem observation experiment platform based on wireless sensor networks[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2021, 36(3): 502-510.[黄艳, 郑玮. 基于无线传感器网络的森林生态系统观测试验平台构建[J]. *遥感技术与应用*, 2021, 36(3): 502-510.]
- [4] Zeng J Y, Li Z, Chen Q, *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. DOI:10.1016/j.rse.2015.03.008.
- [5] Ma H L, Zeng J Y, Chen N C, *et al.* Satellite surface soil moisture from SMAP, SMOS, AMSR2 and ESA CCI: A comprehensive assessment using global ground-based observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111215.
- [6] Fan Yue, Qiu Jianxiu, Dong Jianzhi, *et al.* Error characteristics of microwave soil moisture products based on Triple Collocation and its spatial-temporal pattern [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(1): 85-96.[范悦, 邱建秀, 董建志, 等. 基于 Triple Collocation 方法的微波土壤水分产品不确定性分析与时空变化规律研究[J]. *遥感技术与应用*, 2020, 35(1): 85-96.]
- [7] Ma H L, Zeng J Y, Zhang X, *et al.* Evaluation of six satellite- and model-based surface soil temperature datasets using global ground-based observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 264. DOI:10.1016/J.RSE. 2021.112605.
- [8] Xu L, Chen N C, Chen Z Q, *et al.* Spatiotemporal forecasting in earth system science: Methods, uncertainties, predictability and future directions [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021: 103828. DOI: 10.1016/j.earscirev.2021.103828.
- [9] Dorigo W, Himmelbauer I, Aberer D, *et al.* The International soil moisture network: Serving earth system science for over a decade[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2021: 1-83. DOI: 10.5194/hess-25-5749-2021.
- [10] Zhang X, Chen N C, Li J Z, *et al.* Multi-sensor integrated framework and index for agricultural drought monitoring [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 188: 141-163.
- [11] Chen D, Chen N C, Zhang X, *et al.* Next-Generation soil moisture sensor web: High density in-situ observation over NB-IoT [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3065077.
- [12] Robinson D A, Binley A, Crook N, *et al.* Advancing process-based watershed hydrological research using near-surface geophysics: A vision for, and review of, electrical and magnetic geophysical methods [J]. *Hydrological Process*, 2008, 22(18): 3604 - 3635.
- [13] Zhang X, Chen N C, Chen Z Q, *et al.* Geospatial sensor web: A cyber-physical infrastructure for geoscience research and application[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 185:684-703.
- [14] Kang G, Li X, Jin R, *et al.* Hybrid optimal design of the eco-hydrological wireless sensor network in the middle reach of the Heihe River Basin, China[J]. *Sensors*, 2014, 14(10):19095-19114.
- [15] Wang K, Chen N C, Tong D Q, *et al.* Optimizing the configuration of streamflow stations based on coverage maximization: A case study of the Jinsha River Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 172-183.
- [16] Wang G, Jin Heuvelink, Wang L. Sampling design optimization of a wireless sensor network for monitoring ecohydrological processes in the Babao River Basin, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2015, 29(1): 92-110.
- [17] Xu Xinliang. Spatial distribution data set of China Monthly Vegetation Index (NDVI)[DB/OL]. 徐新良. 中国月度植被指数(NDVI)空间分布数据集[DB/OL]. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>), 2018.DOI:10.12078/201806 0602.
- [18] Sandholt T I, Rasmussen K, Andeessen J. A simple interpretation of the surface temperature/ vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2): 213-224.
- [19] Wang C Y, Qi S H, Niu Z, *et al.* Evaluating soil moisture status in China using the Temperature - Vegetation Dryness Index (TVDI)[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2014, 30(5):671-679.
- [20] Li Chao, Li Xuemei, Tian Yalin, *et al.* Time and space fusion model comparison of temperature vegetation drought index [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(4): 832-844.[李超, 李雪梅, 田亚林, 等. 温度植被干旱指

- 数时空融合模型对比[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(4): 832-844.]
- [21] Lawrence H, Wigneron J P, Demontoux F, *et al.* Evaluating the semi-empirical H~Q model, used to calculate the emissivity of a rough bare soil, with a numerical modeling approach [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(7): 4075-4084.
- [22] Ran Qiong, Zhang Zengxiang, Zhang Guoping, *et al.* Correction of DEM for soil moisture retrieval by temperature vegetation drought index [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(2): 32-36.[冉琼, 张增祥, 张国平, 等. 温度植被干旱指数反演全国土壤湿度的 DEM 订正[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2): 32-36.]
- [23] Vachaud G, Desilans A P, Balabanis P, *et al.* Temporal stability of spatially measured soil-water probability density-function [J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(4): 822-846.
- [24] Li Boxiang, Chen Xiaoyong, Xu Wenting, Spatio-temporal variation of soil moisture based on SMOS downscaling data [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(8): 5-11.[李伯祥, 陈晓勇, 徐雯婷. 基于 SMOS 降尺度数据的土壤水分时空变化分析研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(8): 5-11.]
- [25] Vachaud G, Desilans A P, Balabanis P, *et al.* Temporal stability of spatially measured soil-water probability density-function [J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(4): 822-828.
- [26] Jacobs J M, Mohanty B P, Hsu E C, *et al.* SMEX02: field scale variability, time stability and similarity of soil moisture [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92(4): 436-446.
- [27] Sha Sha, Guo Ni, Li Yaohui, *et al.* Application status and problems of temperature vegetation drought index TVDI in China [J]. Arid Meteorology, 2014, 32(1): 128-134.[沙莎, 郭妮, 李耀辉, 等. 我国温度植被旱情指数 TVDI 的应用现状及问题简述[J]. 干旱气象, 2014, 32(1): 128-134.]
- [28] Specifications for soil moisture monitoring [S]. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China.[土壤墒情监测规范[S]. 中华人民共和国水利部, SL 364-2015.]

Design of Soil Moisture Network based on Temporal and Spatial Variability

Wang Xueqin¹, Zhang Xiang^{1,2}, Chen Nengcheng^{1,2}, Ma Hongliang¹

(1.State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,
Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2.National Engineering Research Center of Geographic Information System, China University of Geosciences
(Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: Reasonable and effective soil moisture observation network can better monitor regional soil moisture based on in-situ data and provide high-precision soil moisture information. Based on the study of spatial and temporal variability of soil moisture in the region from year 2010 to 2019, and superimposed with different types of auxiliary data, the study area was divided twice, and an optimal layout method of soil moisture observation network was designed. On the basis of the existing 24 stations, 79 new stations were added to the designed observation network, which reduced the monitoring area of the existing single point to 381—792 km², and the monitoring efficiency increased by 71.57%. This method follows the idea of "partition before laying out", first utilizing the relative continuous satellite remote sensing data to acquire regional soil moisture geography law, and then deduce the layout plan of the ground station network, which can provide a new reference for the optimization of the layout of the related station network.

Key words: TVDI; Soil moisture; Spatio-temporal variability; Zoning optimization; Design of observation network