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

田晴[1] 陆建忠[1] 陈晓玲[1] 张玉芳[21]

（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．武汉大学遥感信息工程学院，湖北 武汉 430079）

【摘 要】：土壤湿度在水文循环和气候系统中起着至关重要的作用，对农业干旱监测和预测非常重要。选择 ESACCI 主动、被动、主被动合成土壤湿度数据和站点实测土壤湿度数据，运用皮尔逊相关系数检验 CCI 产品的准确性；运用标准化土壤湿度指数方法划分农业干旱等级，运用小波分析、Mann-Kendall 和森斜率趋势检验研究长江流域农业干旱的历史时空演变规律。结果表明：长江流域农业干旱面积呈先增加后减少的趋势，在季节尺度上以春旱和冬旱为主；农业干旱发生的周期为 28、12、22、32a;严重干旱中心具有向低纬度和东经度转移的趋势；金沙江流域南部、岷江沱江流域和嘉陵江流域北部、汉水流域、长江上游、乌江流域、洞庭湖流域西部具有明显干旱趋势，长江源头、洞庭湖流域东部、鄱阳湖流域、长江中游和下游、太湖流域具有明显变湿润趋势，其余地区保持相对稳定。从长时序土壤湿度角度出发，探索了历史上农业干旱的时空演变规律，为农业干旱精准监测和预警提供了新的监测方法。

【关键词】：CCI 土壤湿度数据 农业干旱 长江流域 遥感监测

【中图分类号】:TP79**【文献标识码】**:A**【文章编号】**:1004-8227(2022)02-0472-10

土壤湿度指土壤非饱和层的含水率，是全球气候观测系统指定观测的基本气候变量之一，是陆地植物、土壤生物赖以生存的重要物质源泉之一[1]。土壤水作为陆面生态系统水循环的重要组成，是植物生长发育的基本条件，也是研究植物水分胁迫、进行旱情监测、农作物估产等的一个重要指标[2,3,4]。人们发现土壤湿度的持续影响长达数月之久，这有望借助土壤湿度历史数据集对干旱进行研究。农业干旱是由于长时间降水异常短缺、土壤湿度不能满足农作物水分需求，致使农作物正常生长受到胁迫，进而导致作物生物量和产量减少的现象，因此土壤湿度是农业干旱的重要衡量指标[5]。

原位实测数据是收集土壤湿度测量值的传统方法，提供了大量宝贵的土壤湿度历史数据，但是到目前为止很少有覆盖范围广和周期长的原位实测数据集，这限制了对土壤湿度数据的应用潜力。卫星遥感技术的发展则为面状土壤湿度数据的获取提供了新的解决方案，在过去的几十年中，微波遥感技术的飞速发展使得从卫星获取全球范围内长期的土壤湿度值成为可能。目前全球范围内已经形成并实时运转的多套土壤湿度卫星观测平台和产品包括美国宇航局的 SMAP、欧洲太空局的 SMOS、日本的 AMSR2 以及中国的风云 3 系列卫星(FY3B 和 FY3C)。随着这些卫星产品的出现，国内外研究者已经开展了对这些卫星产品在国内[6]和国

[1]**作者简介**：田晴(1997～),女，硕士研究生，主要研究方向为流域干旱遥感监测.E-mail:qingtian@whu.edu.cn;陆建忠 E-mail:lujzhong@whu.edu.cn

基金项目：国家重点研发计划(2017YFB0504103);武汉市应用基础前沿专项(2019020701011502);湖北省自然科学基金(2019CFB736);江西省重点研发计划(20201BBG71002);测绘遥感信息工程国家重点实验室专项科研经费

外[7]的不同地方进行验证。欧洲太空局(ESA:European Space Agency)气候变化倡议(CCI:Climate Change Initiative)项目发布了由多个被动和主动微波遥感卫星组合而成的土壤湿度数据集，时间长度为 1978 年末至 2019 年，是目前时序最长的微波遥感土壤湿度产品，自发布以来，该数据集也已得到广泛验证[8]。

根据中国 1978～2017 年的农作物受灾面积数据，统计受旱灾、水灾、风雹灾、冷冻灾的农作物面积均值占总受灾面积的比例分别为 53.04%、25.42%、10.49%、7.41%,因此影响农作物生长的自然灾害在很大比例上为旱灾[9]。长江流域面积大，地理环境、气候条件复杂，流域水资源较为丰富，但其降水量的时空分布很不均匀[10]。该区域是中国重要的粮食生产区[11],因此选择长江流域作为研究区域对粮食安全和农业经济极为重要。本文选择长江流域 1979～2019 年 ESACCI 土壤湿度数据，利用站点实测土壤湿度数据进行检验；将土壤湿度转换为标准化土壤湿度指数以划分农业干旱等级，分析长江流域农业干旱的历史时空演变规律。本文对于制订科学合理的农业干旱灾害防范措施和对策具有重要的现实意义。

1 研究区域

长江流域(24° 30′ N～35° 45′ N,90° 33′ E～122° 25′ E)指长江干流和支流流经的广大区域,流经 17 个省和两个直辖市，横跨青藏高寒区、西南热带季风区和华中亚热带季风区,自西北至东南依次为半干旱区、半湿润区、湿润区,总面积为 $1.8\times10^6 km^2$,占中国国土面积的 18.83%,海拔高度从东部-142m 到西部 7143m[11,12](图 1)。长江流域水资源较丰富，但时空分布不均匀，年均降水量从西部 500mm 到东部 2500mm,其中 60%以上的降水集中在夏季(6～8 月)[10,13];受太阳辐射、大气环流、青藏高原等综合影响，长江流域空气温度呈现东高西低、南高北低的分布趋势，江源地区是全流域气温最低的地区，而四川盆地、云贵高原和金沙江河谷等地则形成高温封闭中心[14]。上部，中部和下部气候条件的剧烈空间异质性对农作物的产量产生重大影响，独特的自然资源条件(包括光、热、水和土壤)有利于该地区的农业发展。长江流域有中国 6 个主要的粮食产区，成都平原、江汉平原、洞庭湖区、鄱阳湖区、巢湖地区和太湖地区都是中国主要的商品粮基地[11]。因此长江流域在中国的作物生产和粮食安全中发挥着重要作用。

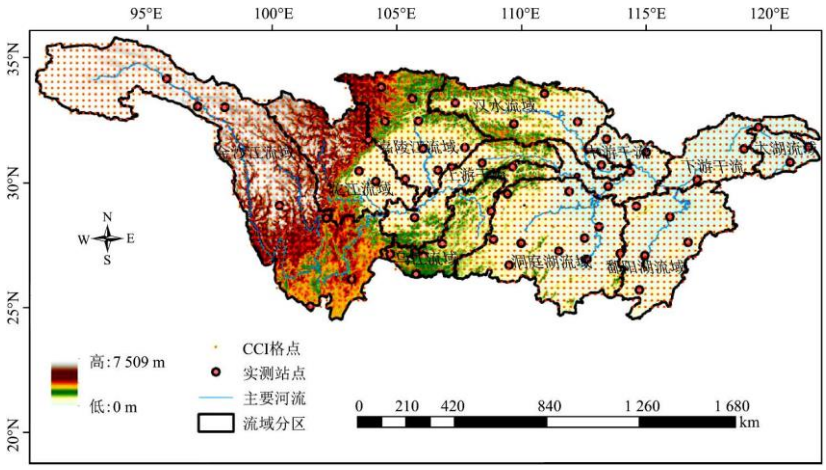

图 1 长江流域地理位置、高程、CCI 格点及土壤湿度实测站点

2 数据和方法

2.1 数据

2.1.1 卫星土壤湿度数据

本文使用欧空局土壤湿度气候变化倡议项目发布的全球地表土壤湿度多卫星合成产品，简称 CCI 土壤湿度数据集。该数据

集空间分辨率为0.25°×0.25°,时间分辨率为1d,可观测到表层(0.5～5cm)土壤湿度。该数据集参考了多种主动微波土壤湿度产品(ERS-1/2AMI-WS 及 MetOp-A/BASCAT)及被动微波土壤湿度产品(Nimbus7SMMR、DMSPSSM/I、TRMMTMI、AquaAMSR-E、CoriolisWindSat、SMOS及GCOM-W1AMSR2),并采用累积分布函数匹配的方法,将主、被动微波土壤湿度产品融合得到长时序主被动被微波合成土壤湿度产品。本文采用的CCI土壤湿度数据集为V04.7版本,产品格式为NetCDF-4,坐标系为WGS84。选取1979年1月1日至2019年12月31日为研究时段,时间尺度为年尺度和季节尺度(春季3～5月、夏季6～8月、秋季9～11月、冬季12～2月),在长江流域共有2540个网格点(图1)。

2.1.2 站点实测土壤湿度数据

本文选取实测站点表层土壤湿度数据用于对 CCI 产品进行检验，数据源于国家气象科学数据中心发布的中国农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集，该数据集包含了1991年5月至2006年2月中国农气站观测的旬值10cm土壤相对湿度。长江流域土地利用类型和土壤类型复杂多样[12],为更有效对 CCI 产品进行验证，本文选择 54 个实测站点上旬数据进行检验，保证长江流域每一子流域包含 5～7 个实测站点，实测站点所在位置的土地利用类型主要为耕地、草地、林地，土壤类型包含了高山土、(半)淋溶土、人为土、初育土、铁铝土、半水成土。

2.1.3 作物受旱灾面积年鉴数据

本文选取作物受旱灾面积用于验证干旱指数在监测农业干旱方面的适用性，所用到的 1984 至 2018 年长江流域部分省市的农作物受旱灾面积数据来自于《中国农村统计年鉴》中的各地区受灾和成灾面积小节，均可从中国知网下载得到。

2.2 方法

2.2.1 标准土壤湿度指数(ESSMI)

标准土壤湿度指数(Empirical Standard Soil Moisture Index,ESSMI)的计算方法如下：首先，选取一个概率密度函数对长时序的土壤湿度数据 $x_{t1},x_{t2},\cdots,x_{tn}$ 进行拟合，其中 n 为年份，t 为不同时间尺度；其次，使用拟合得到的概率密度函数计算土壤湿度值 x_t 所对应的累积概率 $F(x_t)$;最后，将累积概率 $F(x_t)$ 转换为标准正态变量 Z(均值为 0 且方差为 1),即可得到 ESSMI。为了对比不同分布函数在研究区的适用性，本文对比了非参数的基于核密度估计(Kernel Density Estimation,KDE)[15]的经验概率密度函数、Gamma 分布和 Normal 分布函数，使用均方根误差 RMSE 来评价不同分布函数的拟合优度。本文使用 MATLAB 软件中的 Distribution Fitter 工具箱对土壤湿度数据的概率分布进行拟合。

2.2.2 数学统计分析方法

皮尔逊积矩相关系数是常用的相关分析方法[16],可用于描述两个随机变量之间的线性相关程度。本文运用相关系数检验 CCI 数据与实测数据之间相关性的强弱。

连续小波变换可以揭示时间函数中不同频率成分在局部时域中的振幅、位相和功率谱特征，是时频分析的有效工具，水文分析中常用 Mexcian Hat 小波、Morlet 小波和 Complex Morlet 小波[17]。本文采用这 3 类小波函数分析长江流域农业干旱面积对时间尺度变换规律，并对长江流域的农业干旱周期进行分析。

Mann-Kendall(M-K)和森斜率都是非参数统计检验方法，是水文时间序列趋势检测中广泛使用的方法[18,19]。二者的统计量为正时均表示具有增加趋势，为负时均表示具有减小趋势。森斜率常和 M-K 检验结合对趋势变化进行显著性检验，可以在一定程度上提高趋势判断的准确性，本文将二者结合对长江流域的农业干旱趋势进行分析。

3 结果与讨论

3.1 长江流域 CCI 土壤湿度产品验证

本文提取 1991 年 5 月至 2006 年 2 月的主动、被动、主被动合成 CCI 土壤湿度产品上旬均值数据，与 54 个实测站点数据进行验证，结果如图 2 所示。主动、被动、主被动合成产品与实测数据的 R 中值分别为 0.47、0.14、0.55,图 2(a)显示，主被动合成产品与实测数据的相关性最强；图 2(b)实测、主动、被动数据为主纵坐标范围，主被动合成数据为次纵坐标范围，图 2(b)显示，被动产品有较多数据缺失，在长江流域的适用性最差；通过观察图 2(b)并对比图 2(c)～图 2(e)散点图，发现实测土壤湿度值均比 CCI 产品值高，这说明 CCI 产品对土壤湿度存在低估现象，文献[20]也具有相似发现，但本文采用的标准土壤湿度指数方法可以避免数据绝对量偏差的影响，更关注数据的相对趋势特征。因此，本文选用 CCI 主被动合成土壤湿度产品进行后续研究。

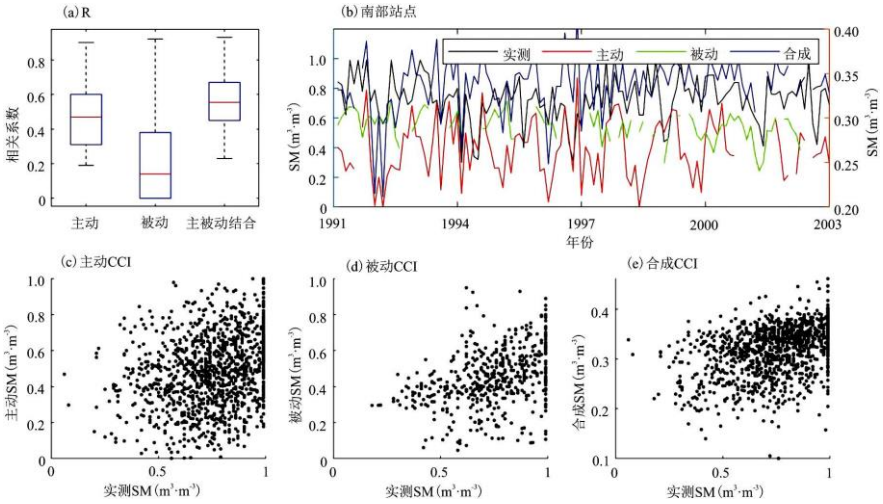

图 2 长江流域 CCI 土壤湿度产品的验证

3.2 基于 ESSMI 的长江流域干旱判别

3.2.1 基于 ESSMI 的干旱等级划分

本文以 116.75° E～117° E,33.5° N～33.75° N 研究区为例对比了 KDE、Gamma、Normal 分布函数与 CCI 土壤湿度年均值累积分布的拟合效果(见图 3)。基于 KDE、Normal、Gamma 分布概率密度函数与土壤湿度数据拟合的均方根误差分别为 0.1752、0.1777、0.1990。图 3 显示，KDE 的累积概率曲线与实际累积概率最为接近，在土壤湿度值的整个分布范围内，KDE 概率密度函数的拟合效果都是最好的，尤其是在土壤湿度低值区 0.22～0.28$m^3 \cdot m^{-3}$,这对于研究土壤的干旱程度较为有利。而 Gamma 和正态分布概率密度函数的累积概率曲线类似，均不能十分准确地表示土壤湿度样本观测值的实际累积概率。因此在接下来的实验中均采用 KDE 概率密度函数对不同时间尺度的 CCI 土壤湿度时序数据进行拟合，并将累积概率转换为标准正态变量 Z,即可得到标准土壤湿度指数 ESSMI。

McKee 等[21]指定，每个地区在 9.2%的时间处于中旱，4.4%的时间处于重旱，2.3%的时间处于特旱，其提出的干旱强度阈值水平被世界气象组织选中并推荐使用,目前已被全球范围内的众多应用采用[15]。因此，本文确定长江流域农业干旱等级对应的 ESSMI 取值范围如表 1 所示。

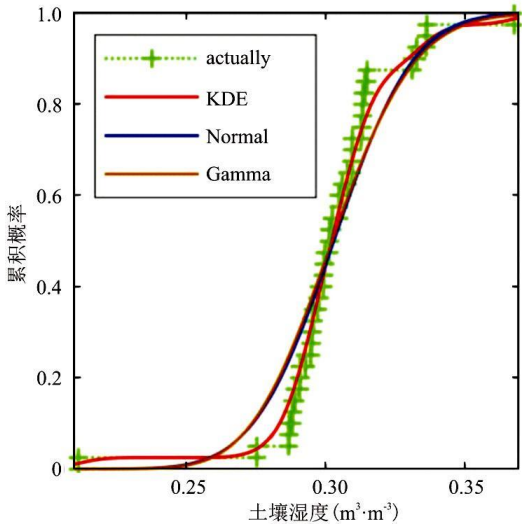

图 3 CCI 年平均土壤湿度的实际累积概率(actually)及拟合累积概率曲线

表 1 干旱类别对应的 ESSMI 值及发生概率

ESSMI	类别	概率
-1.0～0	接近正常	34.1%
-1.5～-1.0	中旱	9.2%
-2.0～-1.5	重旱	4.4%
≤-2.0	特旱	2.3%

3.2.2 ESSMI 与农业受旱灾面积的相关分析

作物受旱灾面积指年内因遭受旱灾使农作物较正常年景产量减产一成以上的农作物播种面积[22],因此作物受旱灾面积与干旱指数的关系最为直接。本文分析了 1984～2018 年长江流域完全(或基本完全)流经的五省、市(四川省、重庆市、湖北省、湖南省、江西省)ESSMI 累积值与作物受旱灾面积之间的时间趋势，如图 4,主纵坐标为受旱灾面积，次纵坐标为 ESSMI 累积值。其中 1996 年之前由于我国省份建制的原因年鉴中四川省与重庆市数据合并，所以二省、市数据从 1997 年开始。结果显示，五省、市 ESSMI 累积值与作物受旱灾面积之间具有相似的变化趋势，受旱灾面积较大的年份 ESSMI 值较小，即更为干旱。这一趋势也表明在长江流域应用 ESSMI 干旱指数进行农业干旱研究的可行性。

3.3 长江流域干旱的时空变化

3.3.1 年际变化特征

1979～2019 年长江流域年尺度 ESSMI 空间分布如图 5(a)所示，对正 ESSMI 值也参照表 1 进行了分类，其中 1988、1989、1990 和 2004 年 CCI 土壤湿度数据缺失较多。总体来看，各个年份长江流域的 ESSMI 值差异较大，高值和低值在空间上聚集，ESSMI 值类似的年份在时间分布上聚集，说明在研究时段内，长江流域某些地区出现了连涝或连旱的现象，这可能与较大尺度的

气候因子有关。ESSMI 对于极涝灾害的捕捉效果并不是很好，比如 1998 年发生的特大洪水在图上并没有体现，这是因为 KDE 概率密度函数在土壤湿度高值区拟合效果较差，而且土壤湿度高于一定值时会达到饱和状态。相邻格网之间的 ESSMI 值过渡平滑，因此 CCI 土壤湿度产品为长江流域提供了很好的农业干旱历史数据集。整体来看，干旱集中在金沙江流域、岷、沱江流域、嘉陵江流域、汉水流域和长江上游，这些地区位于湿润地区西北部、半湿润地区及半干旱地区，干旱可能是降水少、气温高的共同作用导致，长江流域东部大部分地区湿润与该地区的降水较多密切相关。长江流域各等级农业干旱发生格点数的年际变化如图 5(b)～图 5(e)所示，呈先增加后下降的波动趋势。

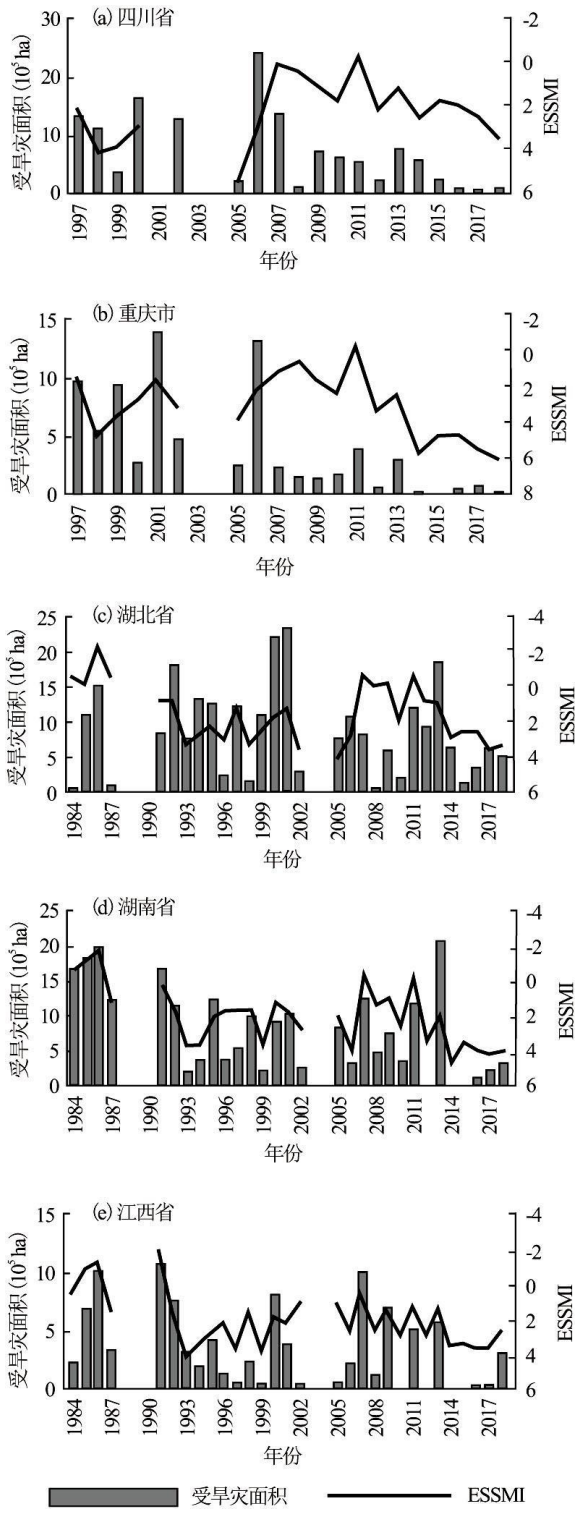

图 4 ESSMI 累积值与作物受旱灾面积

1979～2019 年长江流域农业干旱发生格点总数的小波分析如图 6 所示，小波系数(实部)时频分布显示，Morlet 和 ComplexMorlet 小波变换比 MexicanHat 小波变换更加精细，Morlet 小波系数的模值显示，1～8 年和 11～30 年时间尺度的分级明显；小波系数的模方显示，11～30 年时间尺度的能量最强、周期最显著，1～8 年时间尺度次之；小波方差可用来确定干旱演化过程中存在的主周期，图中存在 4 个明显的峰值分别是 12、22、28、32 年。28 年的周期震荡最强，为流域农业干旱变化的第一主周期，12、22、32 年的周期震荡强度相似，上述 4 个周期波动控制着长江流域的农业干旱。

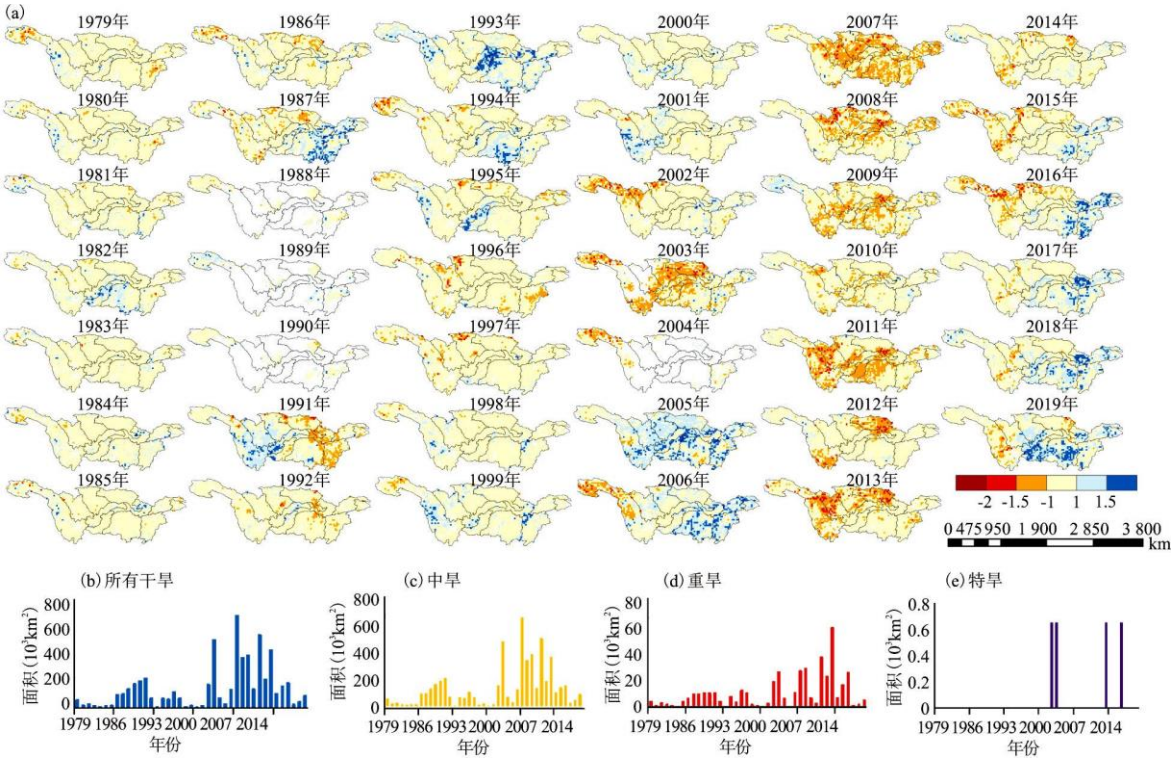

图 5 长江流域 ESSMI 时空分布(a)及年际干旱情况(b)～(e)

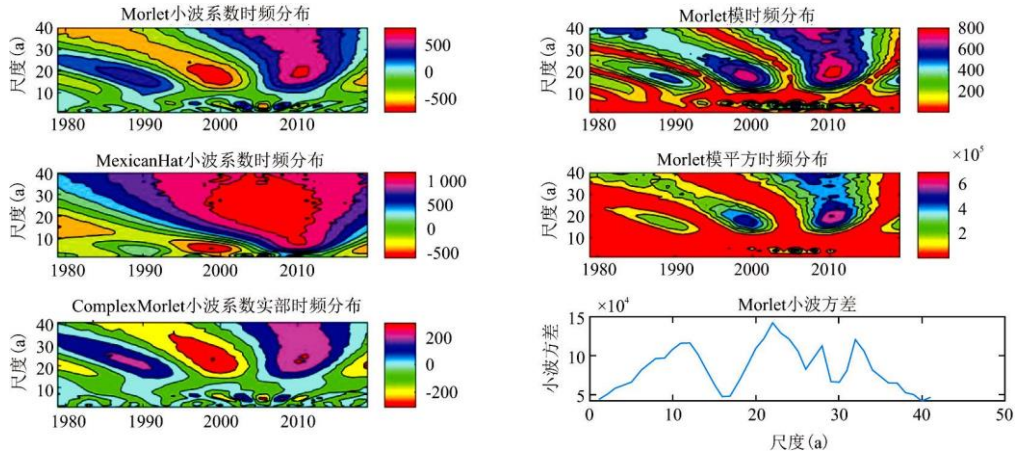

图 6 年际干旱面积的小波分析

本文以 0.25° ×0.25 为基本单元，将长江流域沿纬向和经向分别划分为 44 个及 128 个子区域，统计每个子区域内每年 ESSMI 的最小值，以探索长江流域农业干旱中心的迁移情况。图 5(e)显示，历史上长将流域特旱仅发生 4 次，因此本文选择重旱(-2≤ESSMI≤-1.5)表征干旱中心的迁移情况，如图 7。在纬度方向上，早期重旱集中于高纬度地区，在 2015 年附近所有纬向均发生了重旱，在经度方向上，早期重旱在经向分布上零散分布且集中在西部，2015 年附近在 110.5° ～118.5° 发生了连续的重旱，这说明，除了 2015 年附近发生了较为严重的大范围干旱之外，还显示重旱有向低纬东经转移的趋势。孔冬艳等[9]对 1978～2000 年、2001～2017 年旱灾面积均值热点分布的变化进行研究，发现干旱在中国也存在向南转移的情况，长江流域部分省市旱灾面积也呈现增加趋势。

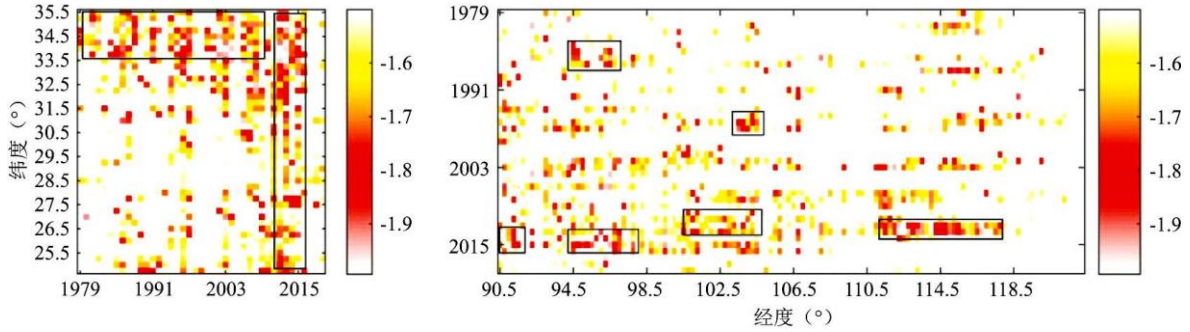

图 7 长江流域纬向和经向的重旱迁移

3.3.2 季节变化特征

长江流域降水的年内分布存在明显的季节性，其中 6～8 月为雨季，降水最为集中，占全年降水量的 60%～90%,降水变化增加了时间和空间分布的异质性，时间模式上具有雨季变湿，旱季变干的特点[23]。降水是影响土壤湿度的主要气象因子，长江流域的农业干旱也表现出明显的季节性变化。基于季节尺度 ESSMI 计算了 41 年来长江流域春季、夏季、秋季和冬季每个格点发生干旱的次数，如图 8。发生干旱格点最多的季节是冬季(1187 个),约 47%的地区发生了干旱，其次是春季(545 个),约 22%的地区发生了干旱，其次是秋季(356 个),约 14%的地区发生了干旱，其次是夏季(344 个),约 13%的地区发生了干旱。因此，长江流域以冬旱和春旱为主。

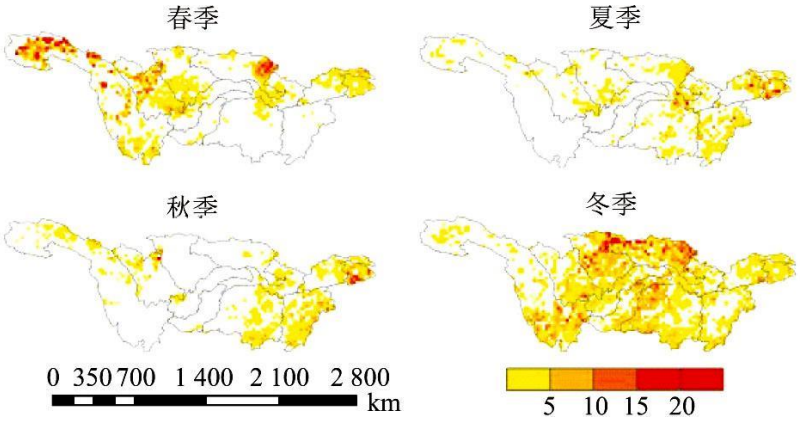

图 8 长江流域季节干旱发生次数

3.4 长江流域干旱变化趋势

为了探索长江流域农业干旱的变化趋势，本文通过 M-K 法和森斜率法对 ESSMI 进行趋势检验，统计检验显著性水平 α 取 0.05 和 0.01,即 Zα<-2.58 时为极显著下降、-2.58≤Zα<-1.96 时为显著下降、-1.96≤Zα<0 时为缓慢下降。图 9 显示，M-K 法和森斜率法的结果趋于一致，均显示金沙江流域南部、岷江沱江流域北部、嘉陵江流域北部、汉水流域西北部、长江上游、乌江流域、洞庭湖流域西部具有明显干旱趋势，长江源头、洞庭湖流域东部，鄱阳湖流域、长江中游和下游、太湖流域具有明显变湿润趋势，其余地区保持相对稳定。1979～2019 年长江流域约 67%的地区 ESSMI 呈现下降趋势，其中显著干旱化趋势的面积比为 9%,极显著干旱化趋势的面积约占研究区的 22%。Cui 等[24]对长江流域的年降水量和年平均温度进行了研究，发现自 1960 年来长江流域源区年降水量显著增加，并认为长江流域东南和西北变得湿润，中部地区有干旱的趋势；此外，Chen 等[25]和李军等[26]也得出长江流域中部有干旱化趋势，这和我们的研究结果一致。

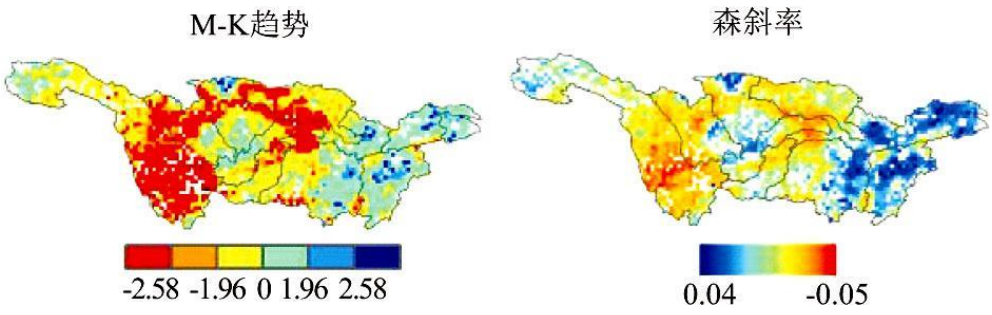

图 9 长江流域 ESSMI 森斜率和 M-K 趋势

4 结论

微波遥感卫星观测的长期土壤湿度数据为探索农业干旱事件提供了长时序的数据支持，对制订农业干旱灾害防范措施具有重要的现实意义。本文选取长时序的主被动微波合成 ESACCI 土壤湿度产品，验证并分析了长江流域 ESACCI 土壤湿度的长期数据，并得出以下结论。

(1)与 ESACCI 被动数据和主动数据相比，ESACCI 主被动结合数据与实测数据具有更显著相关性；采用基于 KDE 概率密度函数对时序年平均或季平均土壤湿度值进行拟合，能更好的拟合长江流域的土壤湿度；年尺度和季尺度 ESSMI 对长江流域干旱的响应较好，该卫星数据很好地记录了农业干旱年份和季节的发生；表明 ESACCI 土壤湿度产品为长江流域提供了一个很好的土壤湿度历史数据集。

(2)在年尺度上，长江流域农业干旱面积呈波动趋势，整体上呈先增加后减少的趋势；在季节尺度上，以春旱和冬旱为主，春季是早稻生长的关键时期，应加强对长江流域春旱的防范。

(3)小波变换能有效响应长江流域农业干旱年际变化特征，干旱发生的第一主周期为 28 年，12、22、32 年的周期震荡强度相似，并列为第二主周期，上述四个周期波动控制着长江流域的农业干旱。

(4)通过将长江流域划分为子区域，发现长江流域农业干旱中心具有向东经和低纬转移的趋势。

(5)M-K 趋势和森斜率检验均显示，金沙江流域南部、岷江沱江流域北部、嘉陵江流域北部、汉水流域西部、长江上游、乌江流域、洞庭湖流域西部具有明显干旱趋势，长江源头、洞庭湖流域东部，鄱阳湖流域、长江中游和下游、太湖流域具有明显变湿润趋势，其余地区保持相对稳定，这有助于决策部门采取积极地举措应对流域农业干旱。

参考文献：

[1]STEPHAN BOJINSKI MICHEL VERSTRAETE THOMAS C.Theconcept of essential climate variables in support of climate research,applications,and policy[J].American Meteorological Society,2014,95(9):1431-1443.

[2]LIU L,GUDMUNDSSON L,HAUSER M,et al.Soil moisture dominates dryness stress on ecosystem production globally[J].Nat Commun,2020,11(1):4892.

[3]黄友昕，刘修国，沈永林，等.农业干旱遥感监测指标及其适应性评价方法研究进展[J].农业工程学报，2015,31(16):186-195.

[4]WANG G J,DOLMAN ALBERTUS JOHANNES,BLENDER RICHARD,et al.Fluctuation regimes of soil moisture in ERA-40 re-analysis data[J].Theoretical and Applied Climatology,2010,99(1-2):1-8.

[5]P JOH N.KEYANTAS H.The quantification of drought an evaluation of drought indices[J].American Meteorological Society,2002.

[6]庄媛，师春香，沈润平，等.中国区域多种微波遥感土壤湿度产品质量评估[J].气象科学，2015,35(3):289-296.

[7]WU Q S,LIU H X,WANG L,et al.Evaluation of AMSR2 soil moisture products over the contiguous united states using in situ data from the international soil moisture network[J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2016,45:187-199.

[8]DORIGO WOUTER,WAGNER WOLFGANG,ALBERGEL CLEMENT,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.

[9]孔冬艳，陈会广.近40年来中国农作物与耕地受灾时空特征及影响因素分析[J].长江流域资源与环境，2020,29(5):1236-1246.

[10]XU J J,YANG D W,YI Y H,et al.Spatial and temporal variation of runoff in the Yangtze River basin during the past 40 years[J].Quaternary International,2008,186(1):32-42.

[11]XU X B,HU H Z,TAN Y,et al.Quantifying the impacts of climate variability and human interventions on crop production and food security in the Yangtze River Basin,China,1990-2015[J].Science of the Total Environment,2019,665:379-389.

[12]LU J Z,ZHANG L,CUI X L,et al.Assessing the climate forecast system reanalysis weather data driven hydrological model for the Yangtze River basian in China[J].Applied Ecology and Environmental Research,2019,17(2):3615-3632.

[13]黄梦杰，贺新光，卢希安，等.长江流域的非平稳SPI干旱时空特征分析[J].长江流域资源与环境，2020,29(7):1597-1611.

[14]SANG Y F,WANG Z G,LIU C M.Spatial and temporal variability of daily temperature during 1961-2010 in the Yangtze River Basin,China[J].Quaternary International,2013,304:33-42.

[15]CARRÃO HUGO,RUSSO SIMONE,SEPULCRE-CANTO GUADALUPE,et al.An empirical standardized soil moisture index for agricultural drought assessment from remotely sensed data[J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2016,48:74-84.

[16]姚晓磊，鱼京善，李占杰，等.CCI 遥感土壤水在东北粮食主产区表征干旱的准确性评估[J].北京师范大学学报(自然科学版),2019,55(2):233-239.

[17]孙卫国，程炳岩，杨沈斌，等.区域气候变化对华东地区水稻产量的影响[J].中国农业气象，2011,32(2):227-234.

[18]WANG Y X,ZHANG T,CHEN X,et al.Spatial and temporal characteristics of droughts in Luanhe River basin,China[J].Theoretical and Applied Climatology,2018,131(3-4):1369-1385.

[19]K SEN P.Estimates of the regression coefficient based on kendall′s tau[J].Journal of the American Statistical Association,1968,324(63):1379-1389.

[20]SU B D,WANG A Q,WANG G J,et al.Spatiotemporal variations of soil moisture in the Tarim River basin,China[J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2016,48:122-130.

[21]MCKEE THOMAS B,DOESKEN NOLAN J,KLEIST JOHN.The relationship of drought frequency and duration to time scales[D].//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology.American Meteorological Society Boston,MA,17:179-183.,1993.

[22]李锁强.中国农村统计年鉴[M].北京：中国统计出版社，2021.

[23]ZHANG L,CHEN X L,LU J Z,et al.Precipitation projections using a spatiotemporally distributed method:a case study in the Poyang Lake watershed based on the MRI-CGCM3[J].Hydrology and Earth System Sciences,2019,23(3):1649-1666.

[24]CUI L F,WANG L C,LAI Z P,et al.Innovative trend analysis of annual and seasonal air temperature and rainfall in the Yangtze River Basin,China during 1960-2015[J].Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics,2017,164:48-59.

[25]CHEN X C,ZHANG L P,ZOU L,ET AL.Spatio-temporal variability of dryness/wetness in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin and correlation with large-scale climatic factors[J].Meteorology and Atmospheric Physics,2019,131(3):487-503.

[26]李军,王兆礼,黄泽勤,等.基于 SPEI 的西南农业区气象干旱时空演变特征[J].长江流域资源与环境,2016,25(7):1142-1149.