

# 基于遥感观测的 21 世纪初中国区域地表土壤水及其变化趋势分析

卢麾<sup>①</sup>, 施建成<sup>②</sup>

① 清华大学地球系统科学研究中心, 地球系统数值模拟教育部重点实验室, 北京 100084;

② 中国科学院遥感应用研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101

E-mail: luhui@tsinghua.edu.cn

2011-11-01 收稿, 2012-01-10 接受

国家自然科学基金青年科学基金(51109111)、国家自然科学基金重点项目(40930530)和清华大学自主科研计划(20111081132)资助

**摘要** 综合利用 3 组最先进的 AMSR-E 地表土壤水反演产品, 通过集合分析的方法, 生成中国区域内 2003~2010 年月平均地表含水量集合数据. 在此基础上, 分析了 21 世纪初中国区域内地表土壤水的时空分布格局及变化趋势. 发现: (1) 集合分析数据能在一定程度上克服单一反演产品中的系统偏差, 弥补了单一反演产品的局限性, 得到更加客观的中国区域内遥感地表土壤水时空分布信息; (2) 在这期间, 中国区域内干旱区以变湿为主导, 半干旱区以变干为主导, 总体上变干的面积大于变湿的面积; (3) 三套反演数据年和季的变化趋势各自不同, 但它们都一致显示在夏季变干为主导, 而且这些变干的区域主要分布在我国主要粮食产区; (4) 结合 GPCP 降水变化趋势, 发现气候变化可能是导致干旱区变湿以及半干旱区变干的因素之一; (5) 结合 MODIS 地表温度变化趋势, 发现过去 8 年中降温增温区面积最大(33.2%), 依次为降温降温区(27.4%), 增湿增温区(21.1%)和增湿降温区(18.1%). 其中降温增温区和降温降温区主要分布在我国的重要粮食产区, 而增湿增温区则主要分布在西北部和西藏等非农业区. 这样的变化趋势对我国的农业可持续发展和生态维护是十分不利的.

## 关键词

地表土壤水  
微波遥感  
时空特征  
变化趋势  
中国区域

干旱是我国主要自然灾害之一. 近些年来, 在气候变化的背景下, 北方主要农业区的干旱范围有明显扩大的趋势, 尤以华北地区干旱程度和范围不断增加趋势最为显著. 20 世纪 90 年代后期以来华北平原连年出现大旱, 1997, 1999~2002 年都为旱情较重年份, 不少地区连续 5~6 年遭遇干旱, 导致农业生产损失巨大、水资源极度短缺、生态环境日益恶化<sup>[1]</sup>. 因此, 对干旱的监测预警以及对灾情的评价日益凸显出其重要性. 目前, 我国国家气候中心主要是利用各种常规气象观测要素来实现干旱监测<sup>[2]</sup>, 所利用各种气象干旱指标不能准确及时地反映农业干旱的真实状态. 土壤水分是农作物生长发育过程中最主要的水量来源, 是指示土壤墒情, 估计作物产量的一个重

要指标. 所以, 对田间土壤水分的观测是农业干旱监测与评价中最重要也是最直观的依据.

同时, 地表土壤水是陆面过程中的重要状态变量, 也是影响大气水循环过程的重要因素. 区域及全球尺度的土壤水信息一直是水文、农业、气象和生态等多个领域共同关注的热点课题之一. 土壤水分的时空分布格局及其变化趋势也是分析气候变化对人类社会生活影响的一个关键参数.

但是, 由于地表土壤水具有非常大的时空变异性, 传统的观测手段, 如气象部门建立的土壤湿度监测站网, 其采样点有限, 维护费用高, 很难实现大范围、连续的观测. 因此, 长期以来, 利用基本气象资料和陆面模型进行数值模拟是研究土壤含水量变化

的主要途径之一。在我国,李明星等人<sup>[3]</sup>利用陆面模式和气象观测资料模拟分析了中国区域 1950~2008 年土壤湿度时空变化。Wang 等人<sup>[4]</sup>利用多个陆面模型模拟中国区域土壤水变化,并利用集合方法计算出农业干旱指数,分析 1950~2006 年间的中国农业干旱。马柱国等人<sup>[5]</sup>利用月降水及月平均气温资料反演土壤湿润度,揭示了我国北方 1951~2004 年间的干旱化时空分布特征。这些模拟研究揭示了我国过去 50 年的土壤水时空变化格局,从一定程度上解释了气候变化对我国干湿变化的影响。

由于模型对复杂物理过程的简化处理,参数的不确定性以及气象驱动数据的误差等等因素,模拟结果总存在不确定性和一定的系统偏差。模型模拟并不是客观观测的结果,其精度依赖于大气驱动场的质量。在另一方面,卫星遥感土壤水可以提供客观的地表土壤含水量观测,其结果不依赖于大气变量。因此,虽然当前的卫星土壤水遥感技术存在各种问题,但其可以提供一个独立于气象观测的地表土壤水数据集,这对保证气候变化影响评价的客观性非常重要。

本研究综合利用 3 套全球最先进的 AMSR-E(高级扫描式微波辐射仪)土壤水反演产品,利用集合分析的方法生成时空分布更为合理的集合土壤水数据,结合全球降雨气候学计划(GPCP)的降水数据和中分辨率成像光谱仪(MODIS)的地表温度数据,再现 2003~2010 年中国区域土壤水的时空格局,计算其变化趋势,探究引起其变化的主要动因,分析其变化状态对我国农业可持续发展和生态维护等方面的可能影响。

## 1 数据与方法

### 1.1 AMSR-E 土壤水遥感反演产品

AMSR-E 于 2002 年 5 月搭载在美国航空航天局(NASA)的地球观测卫星系统(EOS) Aqua 卫星升空。同前期的被动微波传感器(如 SMMR<sup>[6]</sup>, DMSP-SSM/I<sup>[7]</sup>)相比,AMSR-E 具有在低频段上较高空间分辨率的数据采集能力(在 6.9 GHz 频率,约 60 km 空间分辨率),近乎实时的数据获取能力,多通道(6.9, 10.65, 18.7, 36.5 和 89 GHz)、双极化(V/H 极化)的工作频率等优点<sup>[8]</sup>。综合利用这些微波波段数据,研究人员从卫星亮温观测中开展了包括地表土壤水在内

的多种参数反演研究。

现在主要有 3 个机构在独立发布和更新 AMSR-E 的全球土壤水反演产品,分别是 NASA、阿姆斯特丹大学(Vrije Universiteit Amsterdam, VUA)与 NASA 联合,日本宇航机构(JAXA)。其他的反演产品如美国农业部(USDA)的单频道算法反演产品<sup>[9]</sup>和意大利应用物理研究所(IFAC-CNR)的回归算法反演产品<sup>[10]</sup>,也具有一定的特点,但由于它们的产品不是定时发布维护,所以在本研究中没有采用。

(i) VUA 土壤水反演产品。该产品首先通过经验回归公式,利用 36.5 GHz 的亮温估算出土壤物理温度;然后利用陆面参数模型(land surface parameter model, LSPM)<sup>[11]</sup>和非线性循环方法,以最小化模型微波极化差指数(microwave polarization difference index, MPDI, 见式(1))与卫星观测微波极化差指数间的差值为目标函数,实现土壤水分和植被含水率的同时反演。VUA 产品同时利用 6.9 GHz(或 10.7 GHz)的水平和垂直极化亮温。该产品现在由 VUA 和 NASA 共同维护,可从 NASA 戈达地球科学与信息服务中心(GES DISC) (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/>) 下载。

$$MPDI = \frac{TB(V) - TB(H)}{TB(V) + TB(H)}, \quad (1)$$

其中,  $TB(V)$ 和  $TB(H)$ 分别代表垂直极化和水平极化的亮温。

(ii) JAXA 土壤水反演产品。日本宇航机构的土壤水分产品主要利用 6.9 和 18.7 GHz 的双极化 4 个频道观测数据进行反演<sup>[12]</sup>。首先,利用辐射传输模型<sup>[13]</sup>模拟各种可能的土壤含水量、植被含水量以及地表温度的组合,建立模拟亮温数据库;然后利用微波极化差指数、土壤水指数(index of soil wetness, ISW, 见式(2))、土壤含水量和植被含水量构造查找表;最后根据卫星在相应频道的亮温观测值通过查找表法来反演土壤水分和植被含水率。

$$ISW = \frac{TB(18.7H) - TB(6.9H)}{TB(18.7H) + TB(6.9H)}, \quad (2)$$

其中,  $TB(18.7H)$ 和  $TB(6.9H)$ 分别代表 18.7 和 6.9 GHz 的水平极化亮温。

(iii) NASA 土壤水反演产品。该产品由 Njoku 等人<sup>[14,15]</sup>开发,主要利用 10.7 和 18.7 GHz 的微波极化差指数,通过回归的方法反演出土壤水。该产品可

以从美国冰雪数据中心(NSIDC)下载<sup>[16]</sup>. 但是, 由于回归反演方法的局限性, 有研究指出该产品在美国以外的区域具有一定的不确定性<sup>[17]</sup>.

上述3个机构都提供全球0.25°和0.5°两个空间分辨率的产品, 时间分辨率也有每日2次、日平均和月平均数据等类型. 因为本研究侧重于对中国区域内地表土壤水的空间格局和长期变化趋势的分析, 所以采用空间分辨率为0.25°的月平均数据. 其中VUA产品为2003~2009年, 而JAXA和NASA产品都为2003~2010年.

### 1.2 GPCP 月平均降水率

众所周知, 地表土壤水变化与降水过程密切相关. 在本研究中, 我们利用GPCP全球降水数据<sup>[18]</sup>分析中国区域内过去8年间的降水变化趋势, 进而探究土壤水变化的可能动因. 我们使用的是最新的2.2版本数据, 可以通过NOAA网站(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>)下载. 原始GPCP数据空间分辨率是1°, 利用双线性插值方法, 得到0.25°分辨率数据.

### 1.3 MODIS MYD11C3 地表温度

在本研究中为了综合分析过去8年地表土壤水变化趋势以及其对农业和生态的影响, 我们将土壤水变化与地表温度变化结合在一起进行分析. 地表温度数据采用与AMSR-E搭载同一颗卫星Aqua上的MODIS反演数据MYD11C3, 可以从美国地震勘探局的网站上下载(<http://lpdaac.usgs.gov>). 该数据空间分辨率为0.05°, 通过box平均方法得到0.25°分辨率的地表温度数据.

### 1.4 标准化处理与集合分析

在模型模拟土壤水的研究中, 有研究表明集合分析的方法比只使用单一模型分析能获得更多的信息, 得到更客观的结果<sup>[19]</sup>. 在本研究中, 我们提出针对AMSR-E卫星反演土壤水产品的集合分析方法, 即将JAXA, NASA和VUA的产品进行集合分析, 生成一套新的集合土壤水数据, 用于分析中国区域内的表层土壤水的时空分布特性.

上述3种土壤水反演产品, 都是在AMSR-E L1B的亮温数据的基础上进行反演. 但是由于各个算法中所采用的辐射传输模型、亮温观测频道、辅助资料库以及反演策略的不同, 导致了它们反演出来的土

表1 三组卫星土壤水反演产品的统计信息(%)

	最大值	最小值	均值	标准偏差
VUA	50.00	1.60	23.63	12.13
JAXA	59.63	2.28	9.27	8.54
NASA	19.73	6.65	11.84	3.10

壤水产品也不尽相同.

表1为3组产品在中国区域内2003~2010年平均土壤水统计值列表. 从表1我们可以发现, 3组数据的均值和标准偏差都相差较大, 如果直接把它们集合在一起, 很容易丢失掉某组数据的信息. 因此本研究采用的集合分析策略是: 首先将卫星反演数据按式(3)进行标准化处理, 将JAXA和VUA的数据都转换到与NASA数据具有相同的均值和偏差的空间上; 然后再对3组数据取均值, 所得数据即为3个反演产品的集合分析数据.

$$A' = \frac{A - \text{mean}(A)}{\sigma_A} \times \sigma_{\text{NASA}} + \text{mean}(\text{NASA}), \quad (3)$$

式中,  $A$ 为JAXA或VUA的原始土壤含水量,  $\text{mean}$ 为平均值,  $\sigma$ 为标准偏差,  $A'$ 为标准化处理后的土壤含水量. 式(3)广泛用于不同来源的土壤水数据比较研究<sup>[17]</sup>.

图1(a)所示为我国东北地区(121°~125°E, 45°~49°N)内平均土壤水时间系列. 可以看出, 3个产品的平均值、变化范围和标准偏差都有较大差异. 而如图1(b)所示, 经过标准化后, 3组数据的绝对值相当, 但同时也保持了VUA和JAXA的时间变化特性. 图1(b)中紫色线代表集合分析数据, 可以看出集合数据消减了单个产品的偏差性(如NASA的峰值偏早以及缺失部分数据), 综合了3组反演产品的变化特性.

### 1.5 趋势分析

为了分析地表土壤水、地表温度和降水率的逐年变化情况, 本研究利用一元线性回归模型分析每个像元的线性倾向<sup>[20]</sup>, 拟合相关变量相对于年份的直线方程, 计算2003~2010年8年间的变化斜率, 即倾向值(SLOPE), 计算公式为

$$\text{SLOPE} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i T_i - \left(\sum_{i=1}^n X_i\right) \times \left(\frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}\right)}{\sum_{i=1}^n T_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i\right)^2}{n}}, \quad (4)$$

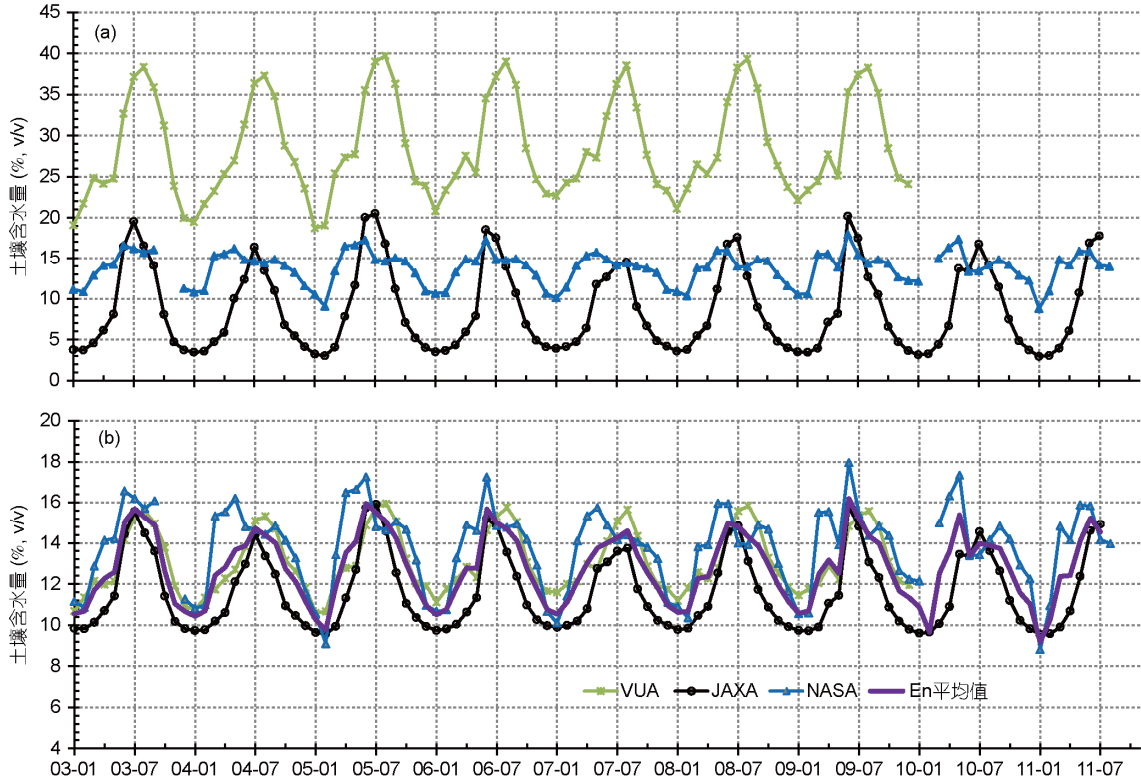


图 1 中国东北区域上 3 组土壤水标准化处理前后比较示例  
(a) 原始数据, (b) 标准化后数据

其中,  $n$  是总年份数, 等于 8;  $T_i$  代表第  $i$  年(2003 为第一年),  $X_i$  代表第  $i$  年对应的分析变量, 如地表土壤水、地表温度等。

## 2 结果分析

### 2.1 卫星反演土壤水的空间分布

图 2 中(a)~(c)展示了 3 组产品经过标准化处理后的多年平均土壤水空间分布。总体上, 3 组产品的干湿空间分布格局基本一致: 西北较干, 东南较湿, 东北平原区也相对湿润。但是, 三者的差异也非常明显。从干湿空间分布格局来说, VUA 产品中湿区最大, 而 JAXA 产品中干区最大。同我国由东南到西北的湿润区-半干旱区-干旱区分布特征相比, VUA 产品比其他两者更为合理。但是 VUA 产品在青藏高原东南部的高寒植被区域显示为大面积的湿区, 这一点与实际情况相违。这一误判可能是由于在青藏高原高寒植被区土壤温度与 AMSR-E 36.5 GHz 亮温的关系不符合 VUA 所使用的经验公式而引起, 因为在这一地区地表加热比较强烈且存在复杂草甸植被。JAXA 产品

整体偏干, 但在沙漠和戈壁区没有明显的干中心。JAXA 产品在四川盆地、长江中下游平原和沿海一带显示为湿区, 从湿区到干区的过渡带比较狭窄, 没有体现出半干旱区与干旱区间的差异。JAXA 算法的这一问题的可能与其查找表算法有关: 预先生成的亮温数据库只能提供有限的反演结果。NASA 产品的干区范围不大, 和 VUA 产品较一致; 而且 NASA 产品在内蒙古西部和新疆塔里木盆地沙漠区显示了两个明显的干中心。但是 NASA 产品的湿中心在东北东部的寒温带针叶林山区, 而且同 VUA 产品一样误判青藏高原东南部为湿区。NASA 产品对东部湿区的误判可能是由于森林的影响; 对青藏高原东南部的误判则可能是由于地形的影响。因为在 NASA 算法里面, 地表粗糙度和植被含水量是用一个参数统一表示<sup>[14]</sup>, 因此在地形复杂或者植被复杂的情况下, 可能会产生误判。NASA 产品在长江中下游平原显示为一个较干区域, 这一误判可能是由于其采用全球尺度的回归公式进行反演<sup>[17]</sup>, 因为其回归参数并没有在中国区域内进行率定。

图 2(d)~(f)分布显示 VUA 与 JAXA, JAXA 与

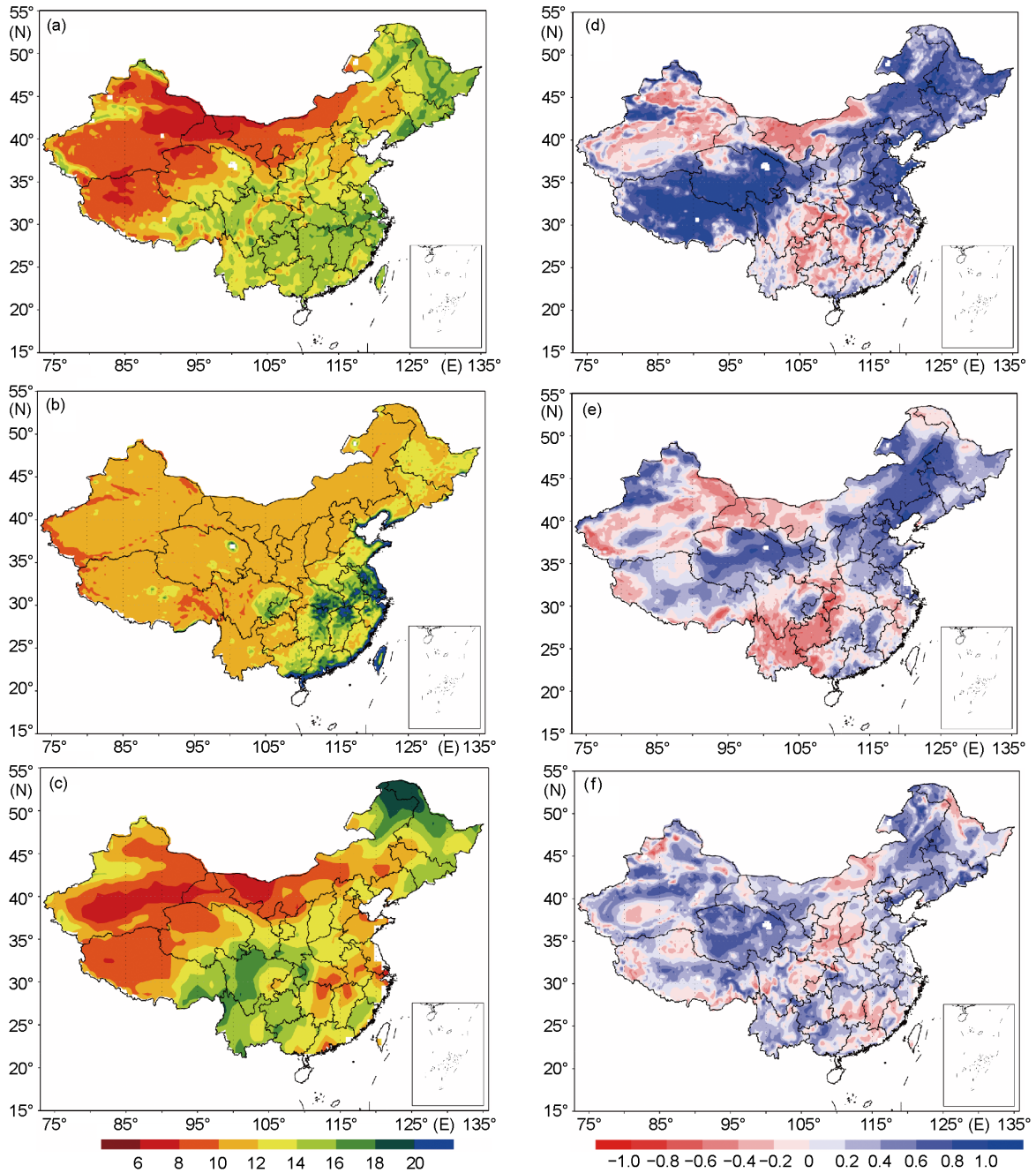


图 2 2003-2010 年平均土壤含水量(%)及相关系数比较

(a)~(c) 分别为标准化后 VUA, JAXA 和 NASA 产品; (d)~(f) 分别是 VUA 与 JAXA 产品、JAXA 与 NASA 产品、VUA 与 NASA 产品间的时间序列相关关系

NASA, NASA 与 VUA 产品时间序列的相关系数, 正值表示 2 组数据在时间系列上变化趋势较一致, 而负值则表示 2 组数据在时间变化趋势上相反. 总的来说, 3 组数据变化趋势相似的面积大于相反的面积: JAXA-NASA 间正相关像元为总数的 61%, JAXA-VUA 间为 68%, VUA-NASA 间为 71%.

图 3 显示 3 组数据间都全都呈现正相关趋势的区域. 这些区域包括: 东北平原大部、内蒙古东部、华北平原、青藏高原北部、甘肃和宁夏中部、新疆北部、江苏大部和安徽北部, 约占总面积的 39.3%.

通过对图 2 和 3 的分析表明, 虽然 3 组产品由于自身算法的特点, 在绝对值上存在较大差异, 但是在

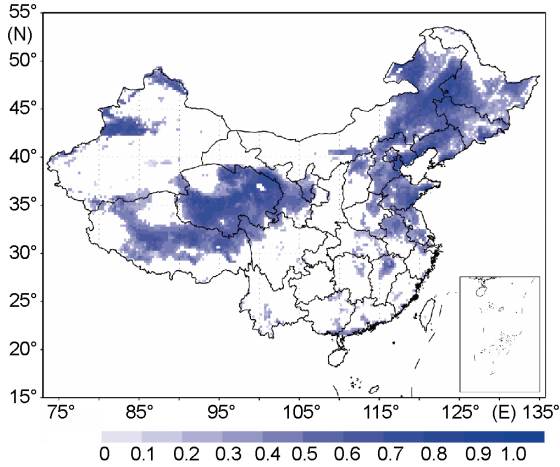


图3 三组产品间都为正相关情况下的平均相关系数空间分布

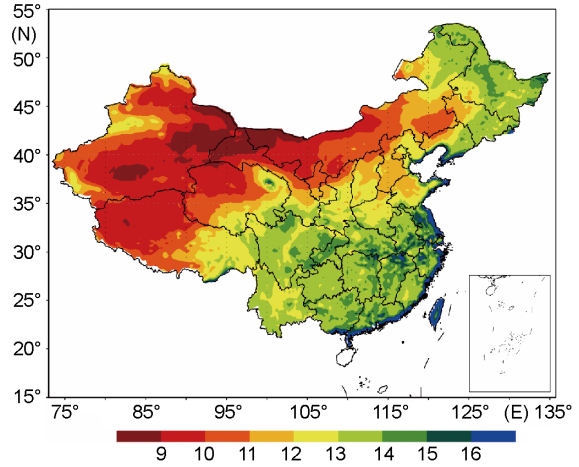


图4 集合分析数据的多年平均土壤水空间分布特征

相对变化上有着较高的一致性。通过本文提出的集合分析方法，将3组数据融合在一块，应该可以克服单一产品的缺陷，综合3套数据的特点，能够更客观的重现过去8年中国区域土壤水时空分布信息。

图4所示为集合分析数据的多年平均土壤水空间格局。从图中可以看出从西北向东南和东北，我国地表土壤水分呈现由干燥到湿润的变化；在35°N附近存在清晰的半干旱过渡区。集合分析数据纠正了VUA和NASA在西藏东南部的误判，以及NASA在长江中下游区域的误判。该数据也继承了NASA产品的优点：在内蒙古西部和塔里木盆地显示了两个清晰的极干区域；而在长江中下游平原、东北中部平原和沿海地区为湿润区。该数据还显示了青海湖周边的湿润地带，以及位于辽宁、吉林、内蒙交界处的科

尔沁沙地周边的较干燥区。集合分析数据所显示的中国区域地表土壤水空间特征基本与其他研究结果相吻合<sup>[3,21]</sup>。

### 2.2 遥感土壤水变化趋势分析

利用前文介绍的趋势分析方法，针对3套反演产品和集合分析数据，分别生成年和每季度的地表土壤水倾向值分布图。如果倾向值大于0，说明在过去8年间随着时间的增加，地表土壤水呈变湿趋势；当倾向值小于0，则说明过去8年间地表土壤水随着时间的增加呈变干趋势。

图5(a)所示为利用集合分析资料计算出的年平均土壤水变化倾向值。红色代表负的倾向值，即地表土壤水变干；蓝色代表正的倾向值，即地表土壤水变

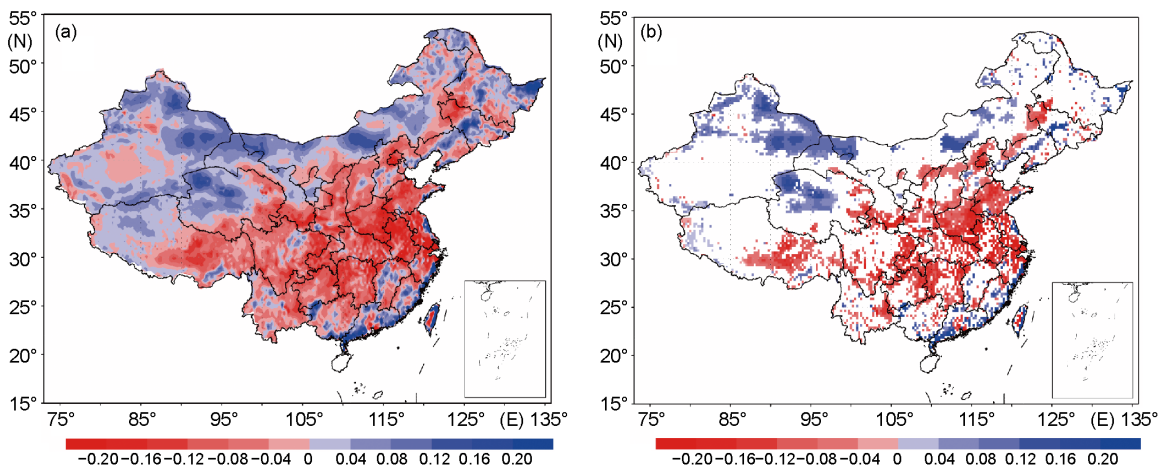


图5 集合分析资料的年土壤水变化倾向值空间分布

(a) 所有像元的倾向值; (b) 90%置信度下的倾向值

湿. 总体上, 地表土壤水变化趋势自西北向东南呈现为变湿-变干-变湿相间的分布格局. 在干旱区, 包括内蒙北部、新疆大部、青海和西藏西部, 呈现变湿趋势; 在这其中, 新疆塔里木盆地中部呈现变干趋势. 在半干旱区域, 包括内蒙吉林和辽宁交界处、华北平原、河南、山西、陕西以及青藏高原东部呈现变干趋势. 青海和西藏的干湿变化趋势与在该区域内湖泊高程变化的趋势基本一致<sup>[22]</sup>. 一部分湿润区, 包括西南地区, 华中大部以及江浙一带, 呈现变干趋势. 在华南湿润区, 包括广东, 福建沿海及江西部分地区呈现变湿趋势. 集合数据体现出的干旱区变湿和半干旱区变干的趋势, 以其他研究<sup>[3-5]</sup>在相应区域的结果基本吻合. 在内蒙东北部的变干区域与该区域的荒漠化扩展研究结果一致<sup>[23]</sup>.

在整个中国大陆区域的 16052 个像元中, 8209 个像元(51.1%)呈现变干趋势, 7792 个像元(48.5%)呈现变湿趋势. 其中, 变化显著的区域(90%置信度)为总像元的 33%. 如图 5(b)所示, 变化显著区以变干区为主, 占总像元的 20%, 主要分布在科尔沁沙地、华北平原、河南、江淮地区、汉江平原、洞庭湖平原、西藏东部等地; 变湿显著区为总像元的 13%, 主要分布在青海西北部, 新疆东北部, 以及广东福建沿海地带.

利用 3 组反演产品和集合数据, 我们应用同样的

方法计算出年平均和各季度平均的线性倾向值. 图 6 比较了 4 组数据中干湿倾向在各个季度的像元比率. 可以看出, 针对年平均地表土壤水, 除 VUA 产品外, JAXA, NASA 和集合数据都显示变干倾向的像元多于变湿倾向像元. NASA 产品在 4 个季节中都表现为变干的像元远多于变湿像元(图 6(c)); 而 VUA 产品中, 除了夏季以外, 其他 3 个季节变湿的像元都占大多数(图 6(a)). JAXA 产品春秋变干和变湿的像元比率相当, 但在夏季变干的像元占绝对多数(图 6(b)). 从集合分析的结果看(图 6(d))春秋变湿像元多于变干像元, 而冬季和夏季则变干像元多于变湿像元. 夏季变干和春季变湿尤为突出. 从干湿像元比率来看, 在年和季节的比较上, 3 个机构的土壤水反演产品表现各自不同; 但是, 在夏季, 三者都表现为变干的像元多于变湿的像元. 这意味着在我国植被的主要生长季节, 3 个机构的土壤水反演产品都表现出变干为主导的线性趋势.

图 7 所示为 VUA, JAXA 和 NASA 3 组土壤水反演产品在夏季里线性倾向一致的区域格局. 三者趋势一致的像元数为 5418 个, 占总像元的 33.8%. 其中变湿趋势的像元 1359 个(8.5%); 变干的像元 4059 个(25.3%). 如图 7 所示, 在夏季里, 3 组反演数据都一致表明我国主要粮食作物产区: 华北平原、河套平

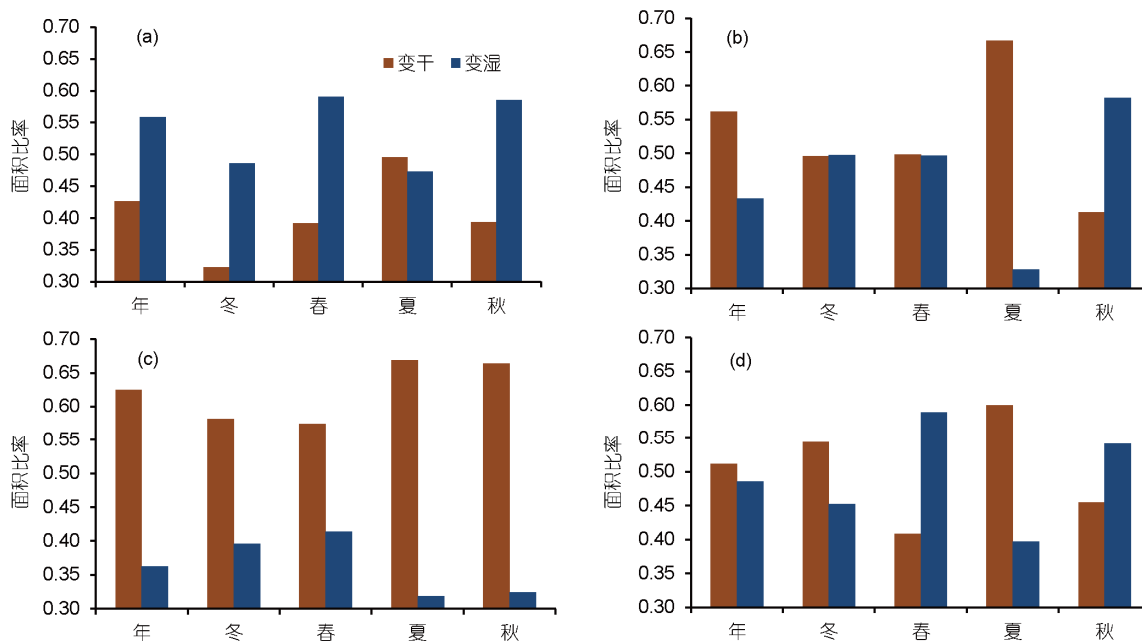


图 6 干湿变化倾向的面积比率柱状图  
(a)~(d) 分别为 VUA, JAXA, NASA 和集合数据的分析结果

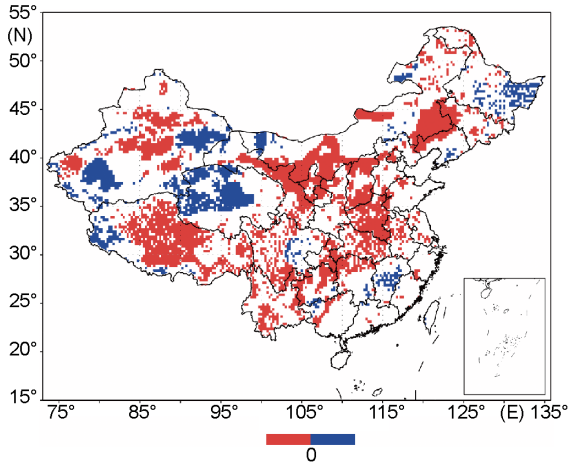


图7 三组土壤水反演产品在夏季里表现为同样线性倾向的空间分布

蓝色代表线性倾向大于0, 红色代表线性倾向小于0

原、江淮地区、汉江平原以及洞庭湖平原都呈现出变干趋势. 综合集合数据分析结果和3套数据一致倾向区的分析结果, 可以确定, 过去8年的夏季中, 中国区域内地表土壤水以变干趋势为主, 而且这些变干的区域主要分布在我国主要粮食产区.

### 2.3 地表土壤水变化趋势与GPCP降水变化趋势

图8所示为GPCP月降水系列与集合土壤水系列的相关系数分布格局. 在95%可信度下显著正相关的像元为10990个, 为中国大陆区域像元数的68%; 负相关像元为1225个, 占10%. 由图可见, 在青藏高原大部、东北地区、华北平原和江淮地区地表土壤水

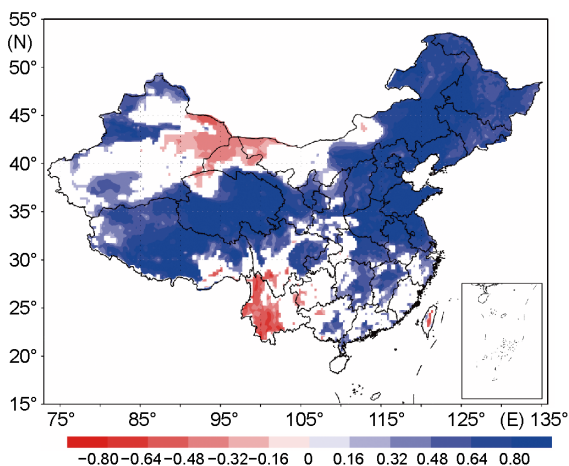


图8 95%可信度下GPCP月降水时间序列与集合土壤水时间系列相关系数

的变化趋势与GPCP降水变化趋势是显著相关的. 而在云南西部和新疆、内蒙、甘肃交界处, 地表土壤水变化趋势与GPCP降水变化趋势是相反的.

利用同样的一元线性回归方法计算出 GPCP 降水数据在中国区域内 2003~2010 年的线性倾向, 如图 9(a)和(b)所示. 可以发现, 据 GPCP 降水数据, 在 2003~2010 的 8 年间, 我国华南及西南区域降水呈增加趋势, 而半干旱地区呈减少趋势, 在西北部的一部分干旱区, 包括青海大部和新疆东部呈现降水增加趋势. 根据图 9(c)和(d)所示, 可以发现我国半干旱区 GPCP 降水减少的同时, 地表土壤水呈现变干趋势; 而在干旱的西北地区(特别青海大部) GPCP 降水增加的同时, 地表土壤水呈现变湿趋势. 因此, 在上述这些区域, 降水变化很可能是导致地表土壤水变化的驱动因素. 在云南、贵州和华南地区, 地表土壤水呈现变干趋势(图 5 和 7)同时 GPCP 降水呈增加趋势(图 9); 而在内蒙古、新疆和甘肃交界处地表土壤水呈增加趋势同时 GPCP 降水呈减少趋势. 这表明在本研究中虽然土壤湿度变化主要受降水控制, 但也与辐射、气温、风速等气候变量有关, 而且也受到地表覆盖和土地利用变化等人类活动的影响.

### 2.4 地表土壤水变化趋势与地表温度变化趋势综合分析

针对 MODIS 的月平均地表温度数据, 也利用线性回归的方法计算出其在 2003~2010 年的变化倾向. 结合地表土壤水变化倾向, 我们把中国区域内水热综合变化的空间格局分为 4 类: (1) 增湿增温区: 土壤含水量增加且地表温度增加的区域, 用蓝色表示; (2) 增湿降温区: 土壤含水量增加且地表温度降低的区域, 用绿色表示; (3) 降湿增温区: 土壤含水量减少且地表温度增加的区域, 用黄色表示; (4) 降湿降温区: 土壤含水量减少且地表温度减低的区域, 用红色表示. 图 10 所示为利用该混合分类法生成的中国区域内夏季水热综合变化倾向的分布图.

从农业生产和生态维护的角度来看, 分类 3 和 4 都是不利的. 分类 3 中的增温效果将加速的蒸腾作用, 而结合地表土壤水的降低则更可能导致农业干旱. 降湿增温区主要分布在东北地区南部、华北平原大部、山西、陕西、甘肃、宁夏、内蒙古中部、四川西部以及青藏高原东部. 其总面积为  $318.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 约占总面积的 33.2%. 降湿降温区主要分布在东北地



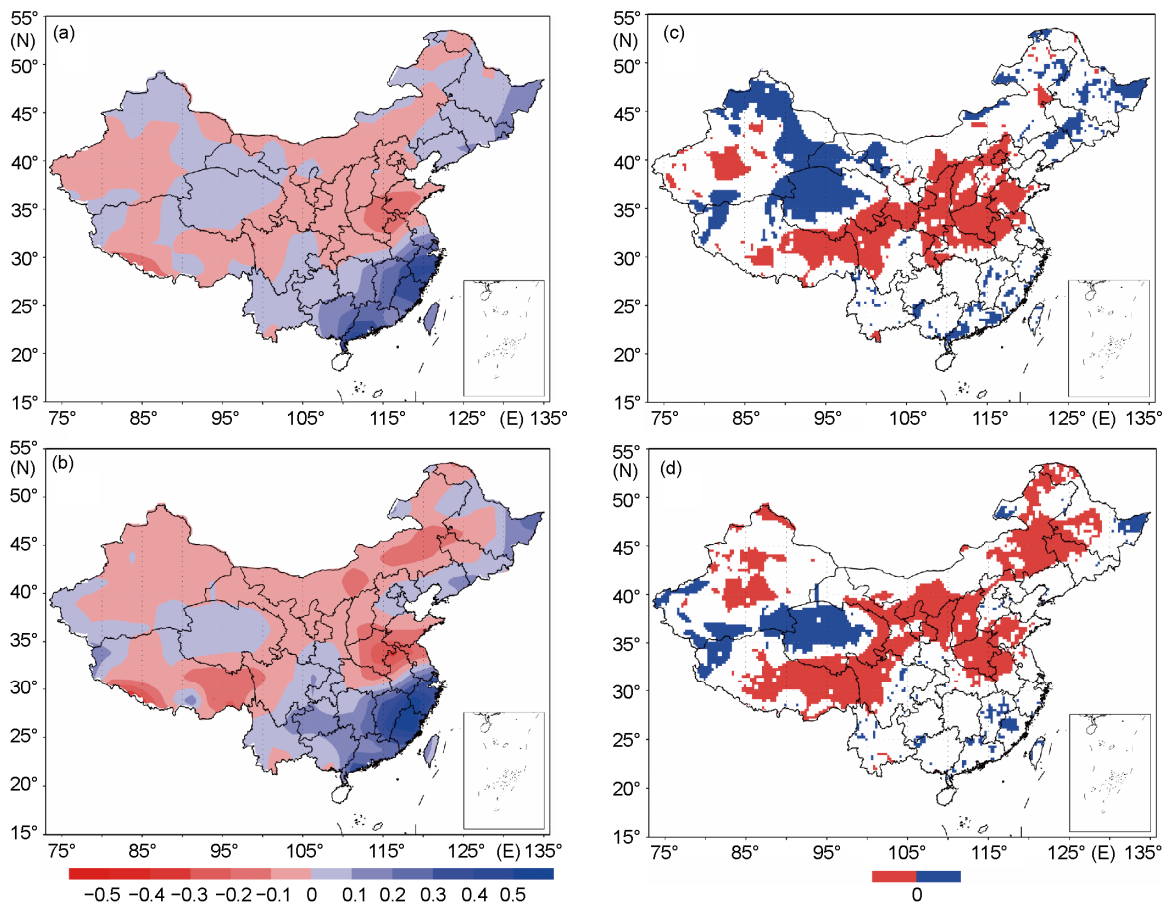


图 9 2003~2010 年间 GPCP 降水线性趋势空间分布及其与集合土壤水趋势一致的区域空间分布

(a)和(b)分别是 GPCP 年平均线性倾向和夏季线性倾向, (c)和(d)为 GPCP 与集合土壤水数据在年平均和夏季倾向一致的区域. 蓝色代表线性倾向大于 0, 红色代表线性倾向小于 0

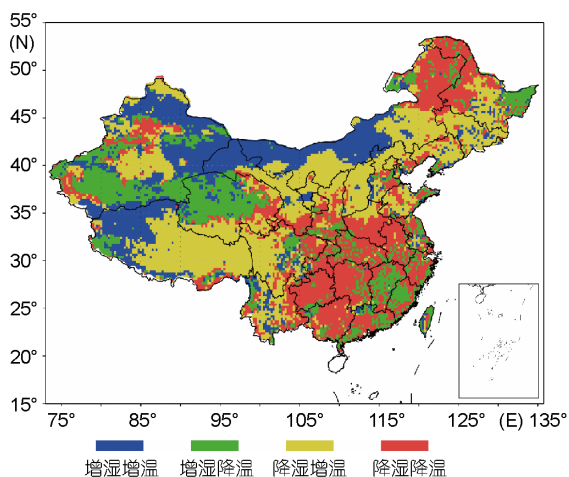


图 10 夏季土壤水线性趋势与地表温度线性趋势混合分类分布图

区北部和华南大部, 面积为  $262.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 约占总面积的 27.4%. 由于夏季的水热供给对东北地区的作

物生长尤为重要, 降温降湿可能会给该地区的农业生产带来较大危害. 可见, 分类 3 和 4 覆盖了我国的主要粮食产区, 对农业的可持续发展十分不利. 而增温增湿区则对农业生产相对有利, 它主要出现在内蒙北部、新疆东部、甘肃北部和西藏西北部. 其总面积为  $202.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 约占总面积的 21.1%. 但是这些地区的并不是我国现在的主要农业产区.

### 3 总结和讨论

本文综合应用 3 套代表世界当前顶级水平的被动微波土壤水反演产品, 研究了我国自 2003~2010 年 8 年间地表土壤水的时空格局及其变化趋势. 由于 3 套反演产品使用的辐射传输模型, 亮温观测频道, 反演算法以及辅助数据的不同, 3 套产品在绝对值上相差较大, 并在某些区域存在一定的系统偏差. 但是, 通过时间系列相关分析, 发现 3 套产品在时间变化趋

势上具有较大的相关性. 在这一基础上, 利用本研究提出的标准化方法和集合分析方法, 将 3 套反演产品融合生成集合数据. 针对集合数据开展了空间格局分析和时间线性倾向分析, 并结合 GPCP 降水数据和 MODIS 地表温度数据, 综合讨论了地表土壤水的时空变化格局及其对我国农业生产和生态维护的影响. 得到初步结论如下:

(1) 在空间分布上, 集合分析的数据能够在一定程度上弥补单一反演产品的局限性, 生成更客观合理的中国区域地表土壤水数据集.

(2) 在时间变化趋势上, 集合数据表明过去 8 年整体上变干趋势的面积(51.1%)大于变湿趋势的面积(48.5%). 总体上, 地表土壤水变化趋势自西北向东南呈现为变湿-变干-变湿相间的分布格局. 干旱区以变湿趋势为主导, 半干旱区则以变干趋势为主导. 就干湿变化趋势而言, 遥感监测的结果基本与数值模拟的结果<sup>[3-5]</sup>基本吻合.

(3) 集合数据和 3 组反演产品在不同季节其干湿趋势的面积比率各自不同. 但是在夏季, 4 组数据都显示为显著变干区域(25.3%)大于变湿区域(8.5%). 过去 8 年的夏季中, 中国区域内地表土壤水以变干趋势为主, 而且这些变干的区域主要分布在我国重要粮食产区.

(4) 集合数据的土壤水时间系列与 GPCP 降水时间系列存在显著的相关关系. 正相关的像元占总像元的 68%. 通过比较两者的线性倾向分布, 认为地表土壤水在干旱区变湿和在半干旱区变干在一定程度上是由于降水在干旱区增加和在半干旱区减少而导致. 因此, 在这些区域气候变化是地表土壤含水量变化的主要驱动力之一. 而在云南、贵州、华南地区、内蒙古北部和新疆东部等地区, 地表土壤水变化不是由于降水变化引起的.

(5) 结合 MODIS 地表温度变化倾向数据与集合土壤含水量变化倾向, 把我国分成 4 类区域. 在过去 8 年的作物主要生长期(夏季)内, 降湿增温区面积最大(33.2%), 依次为降湿降温区(27.4%), 增湿增温区(21.1%)和增湿降温区(18.1%). 其中降湿增温区和降湿降温区主要分布在我国的重要粮食产区, 而增

湿增温区则主要分布在西北部和西藏等非农业区. 这样的变化趋势对我国的农业可持续发展和生态维护是十分不利的.

本文中通过分析表 1 和图 2 发现当前最先进的 3 套土壤水反演产品在绝对值和空间分布上都有较大的差异, 而且在某些区域存在明显的系统偏差. 由此可见, 卫星土壤水反演产品在全球尺度上还不能反映真实的土壤含水量, 只是一个相对的地表土壤湿度指标<sup>[17,24]</sup>. 另一方面也说明被动微波土壤水反演产品还没有实现标准化和制度化, 无论是算法开发还是产品维护都还需要开展进一步的深入研究.

本研究中使用的 AMSR-E 辐射仪因为其波长的限制, 在植物茂盛的区域不能够穿透植被层到达地表. 因此, 在森林地区, 如东北东部的大小兴安岭地区和云南西部的横断山脉地区, 卫星遥感并不能很好地反演土壤含水量. 但这些地区所占面积比很小, 而且不是我们主要关注的农业区. 所以, 这些 AMSR-E 无法观测的地区的存在, 对整个中国区域内土壤含水量时空分布格局影响不大, 不会改变本文的结论. 欧洲空间局(ESA)已经与 2009 年 11 月发射土壤湿度与海洋盐度(SMOS)卫星<sup>[25]</sup>; NASA 预计在 2014 年发射土壤水分主动-被动监测(SMAP)卫星<sup>[26]</sup>. 这两颗卫星能提供比 AMSR-E 波长更长的 L 波段微波观测. 通过使用 L 波段的微波观测资料, 土壤水遥感中的植被遮挡的问题将被逐步解决.

本研究中使用的 AMSR-E 数据为 2003~2010 的 8 年间, 因此本研究的结果只反映 21 世纪初这 8 年间的土壤水的时空分布及其变化情况. 如果综合利用 SMMR, SSM/I, TMI<sup>[27]</sup>, AMSR-E 和未来的 GCOM-W<sup>[28]</sup>的遥感观测数据, 应用本文提出的集合分析方法, 则可以建立起自 1978 年以来的全球遥感地表土壤水时间系列, 用于分析研究全球变化对土壤水分以及相关的水资源、农业、生态等领域的影响. 而且, 由于本研究中所使用的数据都来自卫星遥感资料, 所生成的结果独立于传统的气象观测资料以及数值模拟, 有利于保证气候变化影响评价的独立性, 可为传统的气候评价结果提供宝贵的补充信息.

**致谢** 在本研究中日本宇航机构(JAXA)的 Fujii 博士和东京大学的 Koike 教授提供 JAXA 土壤水产品, 阿姆斯特丹大学的 De Jeu 博士提供 VUA 土壤水产品, 在此谨致衷心感谢.

参考文献

- 1 秦大河. 气候变化: 区域应对与防灾减灾——气候变化背景下极端事件相关灾害影响及应对策略. 北京: 科学出版社, 2009
- 2 邹旭恺, 张强, 王为民, 等. 干旱指标研究进展及中美两国国家级干旱监测. 气象, 2005, 31: 6-9
- 3 李明星, 马柱国, 牛国跃. 中国区域土壤湿度变化的时空特征模拟研究. 科学通报, 2011, 56: 1288-1300
- 4 Wang A H, Lettenmaier D P, Sheffield J. Soil moisture drought in China, 1950-2006. *J Clim*, 2011, 24: 3257-3271
- 5 马柱国, 符淙斌. 1951~2004年我国北方干旱化的基本事实. 科学通报, 2006, 51: 2429-2439
- 6 Gloersen P, Barath F T. Scanning multichannel microwave radiometer for Nimbus-G and Seasat-A. *IEEE J Ocean Eng*, 1977, 2: 172-178
- 7 Hollinger J P, Peirce J L, Poe G A. SSM/I instrument evaluation. *IEEE Trans Geosci Remote*, 1990, 28: 781-790
- 8 Kawanishi T, Sezai T, Ito Y, et al. The advanced microwave scanning radiometer for the earth observing system (AMSR-E), NASA's contribution to the EOS for global energy and water cycle studies. *IEEE Trans Geosci Remote*, 2003, 41: 184-194
- 9 Jackson T J. Measuring surface soil moisture using passive microwave remote sensing. *Hydrol Process*, 1993, 7: 139-152
- 10 Paloscia S, Macelloni G, Santi E. Soil moisture estimates from AMSR-E brightness temperatures by using a dual-frequency algorithm. *IEEE Trans Geosci Remote*, 2006, 44: 3135-3144
- 11 Owe M, De Jeu R, Holmes T. Multisensor historical climatology of satellite-derived global land surface moisture. *J Geophys Res*, 2008, 113: F01002, doi: 10.1029/2007JF000769
- 12 Koike T, Nakamura Y, Kaihotsu I, et al. Development of an advanced microwave scanning radiometer (AMSR-E) algorithm of soil moisture and vegetation water content. *Ann J Hydra Eng, JSCE*, 2004, 48: 217-223
- 13 Lu H, Koike T, Fujii H, et al. Development of a physically-based soil moisture retrieval algorithm for spaceborne passive microwave radiometers and its application to AMSR-E. *J Remote Sens Soc Jpn*, 2009, 29: 253-262
- 14 Njoku E G, Chan S K. Vegetation and surface roughness effects on AMSR-E land observations. *Remote Sens Environ*, 2006, 100: 190-199
- 15 Njoku E G, Jackson T J, Lakshmi V, et al. Soil moisture retrieval from AMSR-E. *IEEE Trans Geosci Remote*, 2003, 41: 215-229
- 16 Njoku E G. AMSR-E/Aqua daily L3 surface soil moisture, interpretive parameters, & QC EASE-Grids V002, 2011. Boulder: National Snow and Ice Data Center, 2004
- 17 Draper S C, Wakler J P, Steinle P J, et al. An evaluation of AMSR-E derived soil moisture over Australia. *Remote Sens Environ*, 2009, 113: 703-710
- 18 Aberson S D, Sampson C R. On the predictability of tropical cyclone tracks in the Northwest Pacific basin. *Mon Weather Rev*, 2003, 131: 1491-1497
- 19 Wang A H, Bohn T J, Mahanama S P, et al. Multimodel ensemble reconstruction of drought over the continental United States. *J Clim*, 2009, 22: 2694-2712
- 20 魏风英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007
- 21 张文君, 周天军, 宇如聪. 中国土壤湿度的分布与变化 I. 多种资料间的比较. *大气科学*, 2008, 32: 581-596
- 22 牛振国, 张海英, 王显威, 等. 1978~2008年中国湿地类型变化. *科学通报*, 2012, 57: 1400-1411
- 23 刘爽, 宫鹏. 2000~2010年中国地表植被绿度变化. *科学通报*, 2012, 57: 1423-1434
- 24 Liu Y Y, Parinussa R M, Dorigo W A, et al. Developing an improved soil moisture dataset by blending passive and active microwave satellite-based retrievals. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2011, 15: 425-436
- 25 Kerr Y H, Waldteufel P, Wigneron J P, et al. Soil moisture retrieval from space: The soil moisture and ocean salinity (SMOS) mission. *IEEE Trans Geosci Remote*, 2001, 39: 1729-1735
- 26 Entekhabi D, Njoku E G, O'Neill P E, et al. The soil moisture active passive (SMAP) mission. *Proc IEEE*, 2010, 98: 704-716
- 27 Jackson T J, Hsu A Y. Soil moisture and TRMM microwave imager relationships in the Southern Great Plains 1999 (SGP99) experiment. *IEEE Trans Geosci Remote*, 2001, 39: 1632-1642
- 28 Imaoka K, Shibata A, Kachi M, et al. Status of the GCOM-W and onboard AMSR follow-on instrument. *P Soc Photo-Opt Ins*, 2006, 6361: U33-U40