

邓明珊, 孟宪红, 马英赛, 等. 基于 GLDAS 产品的青藏高原土壤湿度特征分析[J]. 干旱气象, 2018, 36(4): 595–602, [DENG Mingshan, MENG Xianhong, MA Yingsai, et al. Analysis on Soil Moisture Characteristics of Tibetan Plateau Based on GLDAS[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(4): 595–602], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-04-0595

## 基于 GLDAS 产品的青藏高原土壤湿度特征分析

邓明珊<sup>1,2</sup>, 孟宪红<sup>1,2</sup>, 马英赛<sup>1,2</sup>, 安颖颖<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院西北生态资源环境研究院, 中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化  
重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**选取青藏高原中部那曲地区 10 个试验点 2010 年 8 月至 2012 年 12 月的土壤湿度数据与全球陆面数据同化系统(GLDAS)中 4 个陆面过程模型(NOAH、CLM、VIC、MOSAIC)模拟得到的土壤水分产品进行对比分析,发现 NOAH 陆面模式资料在青藏高原适用性较好。采用中国科学院青藏高原研究所那曲站 10 个试验点观测土壤湿度资料和长时间序列的 GLDAS 陆面模式资料研究青藏高原地区不同深度土壤湿度的时空分布特征。结果表明:那曲地区土壤湿度呈现显著的季节变化特征,一年之中出现两个峰值和两个低值阶段。基于 NOAH 陆面数据同化产品发现青藏高原土壤湿度的空间分布呈现明显的纬向分布特征,随纬度的升高,土壤湿度值降低;同时,青藏高原中部浅层土壤和中间层土壤湿度有变湿的趋势。0~10 cm、10~40 cm、40~100 cm 土壤湿度 EOF 展开第一模态(EOF1)在高原北部及南部呈反位相分布。

**关键词:**土壤湿度;青藏高原;GLDAS;时空分布

**文章编号:**1006-7639(2018)04-0595-08 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-04-0595

**中图分类号:**P468.0<sup>+</sup>23

**文献标志码:**A

### 引 言

土壤湿度作为陆面过程的一个重要参数,其变化能够直接影响地气间水气通量的交换<sup>[1]</sup>,其对气候变化的影响仅次于海表面温度,在陆地上,甚至超过了海温对气候的影响<sup>[2]</sup>。有“世界屋脊”之称的青藏高原,通过动力和热力作用直接或间接地影响着我国气候和全球大气环流及气候变化<sup>[3]</sup>。冬季,高原海拔高、冰雪覆盖面积广、反照率增强、太阳辐射减小、降温明显,在青藏高原形成一个冷高压;夏季,青藏高原为一热低压,从南亚地区输送大量暖湿气流,加强西南季风,造成高原下游江淮地区降水过程,因此青藏高原对我国乃至全球气候都有重要作用<sup>[4-11]</sup>。

研究表明,青藏高原土壤湿度具有典型的季节性特征,土壤湿度春季最大、夏季次之、秋季最小<sup>[1]</sup>。各层土壤湿度也不相同,浅层和深层低湿、中间层高湿,随着土壤深度的增加,土壤湿度变化梯度逐渐减小。随着季节变化,高原浅层土壤湿度大

值分布区向北移动,中间层土壤湿度存在相反的变化趋势,深层土壤湿度季节性特征不强<sup>[12]</sup>。高原南部是高湿区,与深层土壤相比,浅层土壤湿度波动较大。

利用高原中部土壤湿度观测数据对全球陆面数据同化系统(global land data assimilation system,简称“GLDAS”)中 4 个陆面过程模型(NOAH、CLM、VIC、MOSAIC)模拟得到的土壤水分产品进行评估,发现 4 个模式均低估表层土壤湿度,而 CLM 和 NOAH 模式资料对 10~40 cm 土壤层湿度代表性较好<sup>[13]</sup>。同时也有研究表明,GLDAS 产品显示的青藏高原土壤湿度空间分布特征与降水具有一定程度的不一致性,显示出 GLDAS 产品在青藏高原地区存在一定的应用缺陷<sup>[14-15]</sup>。因此,本研究将基于更长时间序列的土壤湿度观测网数据,评估 GLDAS 四套陆面数据同化产品在青藏高原的适用性及其变化特征。

收稿日期:2018-04-23; 改回日期:2018-05-23

基金项目:国家自然科学基金项目(91437102,41375015)资助

作者简介:邓明珊(1994—),女,主要从事陆面过程与气候变化研究. E-mail:dengmingshan1994@163.com。

1 资料与方法

1.1 资料

选取的高原范围为 75° E—105° E、25° N—40° N<sup>[16]</sup>,那曲试验点分布于 91. 5° E—92. 5° E、31° N—32° N。图1显示观测网在青藏高原中部的

地理位置。

(1)观测资料来自中国科学院青藏高原研究所那曲数据观测网,选取 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 土壤碎石量可忽略的 10 个试验点(图 2)自 2010 年 8 月至 2012 年 12 月的土壤湿度观测数据,该土壤湿度数据分为4层,分别是10 cm、40 cm、100 cm、200 cm,

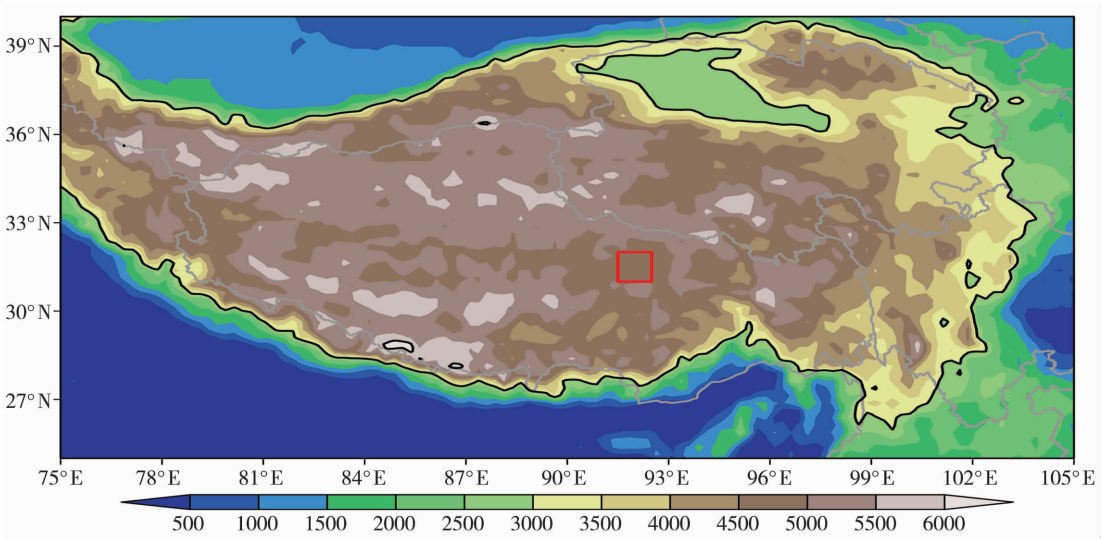


图 1 青藏高原主体范围分布(红色方框表示观测网在高原的地理位置,阴影表示海拔高度,单位:m)  
Fig. 1 The distribution of main scope of the Tibetan Plateau ( red box represents the monitoring network on the central Tibetan Plateau, the shaded for altitude, Unit:m)

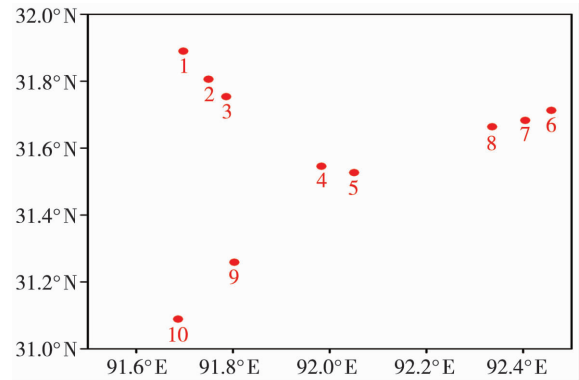


图 2 那曲地区试验点分布  
Fig. 2 Test points distribution map in Naqu

数据每隔 30 min 存储一次。

(2)美国国家航空航天局(NASA)提供的 GLDAS 中 4 个陆面过程模型( NOAH、CLM、VIC、MOSAIC)模拟得到的全球土壤水分产品。选取 NOAH(分辨率为 0. 25° × 0. 25°)、CLM、VIC、MOSAIC(分辨率均为 1° × 1°)2010 年 8 月至 2012 年 12 月的土壤湿度数据。长时间序列选取青藏高原地区 1979—2015 年 NOAH 月平均土壤湿度数据(表 1)。前者主要用于数据比较分析,后者主要用于青藏高原地区土壤湿度的特征分析。

表 1 陆面过程模型相关参数

Tab. 1 The parameters of land surface process models

| 陆面过程模型 | 时间分辨率/h | 空间分辨率           | 土壤湿度层次/cm                     |
|--------|---------|-----------------|-------------------------------|
| NOAH   | 3       | 0. 25° × 0. 25° | 10、40、100、200                 |
| CLM    | 3       | 1° × 1°         | 2、5、9、17、29、49、83、138、230、343 |
| VIC    | 3       | 1° × 1°         | 2、150、350                     |
| MOSAIC | 3       | 1° × 1°         | 10、160、190                    |

## 1.2 研究方法

提取 GLDAS 四套陆面模式资料中与那曲站 10 个试验点对应的土壤湿度数据,为了减小误差,采用邻近格点的土壤湿度数据,将土壤湿度观测数据与陆面模式数据单位统一为体积含水量( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ )。将那曲站 10 个试验点的 4 层土壤湿度资料做区域平均之后与 GLDAS 四套陆面模式资料进行对比。0~10 cm 土壤湿度观测资料与 NOAH 0~10 cm、CLM 0~9 cm(0~2 cm、2~5 cm、5~9 cm 三层累积)、VIC 0~2 cm、MOSAIC 0~10 cm 土壤湿度数据进行对比;10~40 cm 的土壤湿度观测资料与 NOAH 10~40 cm、CLM 9~49 cm(9~17 cm、17~29 cm、29~49 cm 三层累积)的土壤湿度资料进行对比;40~100 cm 土壤湿度观测资料与 NOAH 40~100 cm、CLM 49~138 cm(49~83 cm、83~138 cm 两层累积)土壤湿度数据进行对比;100~200 cm 土壤湿度观测资料与 NOAH 100~200 cm、CLM 138~230 cm 的土壤湿度资料进行对比。由于 VIC 与 MOSAIC 中间层与深层土壤层次与科考所得的土壤湿度层次相差较大,故对 VIC、MOSAIC 只做了表层分析验证。

为定量分析 GLDAS 四套陆面模式资料在青藏高原的适用性,计算了观测数据与陆面模式资料的标准差、相关系数、均方根误差。同时使用 Taylor 图<sup>[4]</sup>直观给出观测数据与陆面模式资料的表现情况。

EOF 分析是气象学中的常用方法,具有收敛快又能更好地反映出场的基本结构特征的特点<sup>[17-18]</sup>。文中采用 EOF 分析方法研究青藏高原地区土壤湿度时空分布特征。

## 2 陆面模式资料与观测数据的比对

### 2.1 时间演变规律

图 3 为观测和模式土壤湿度资料的区域平均值随时间的演变规律。非冰冻期(5—10 月) VIC 和 NOAH 陆面模式资料在青藏高原浅层土壤适用性较好,冰冻期(11 月至次年 4 月) NOAH 土壤湿度资料适用性远远高于其他三种陆面模式资料,其随时间的演变规律与观测值基本一致。非冰冻期 NOAH 陆面模式产品在 10~40 cm、40~100 cm 土壤深度适用性较好。GLDAS 土壤湿度资料对于青藏高原深层土壤适用性较差。

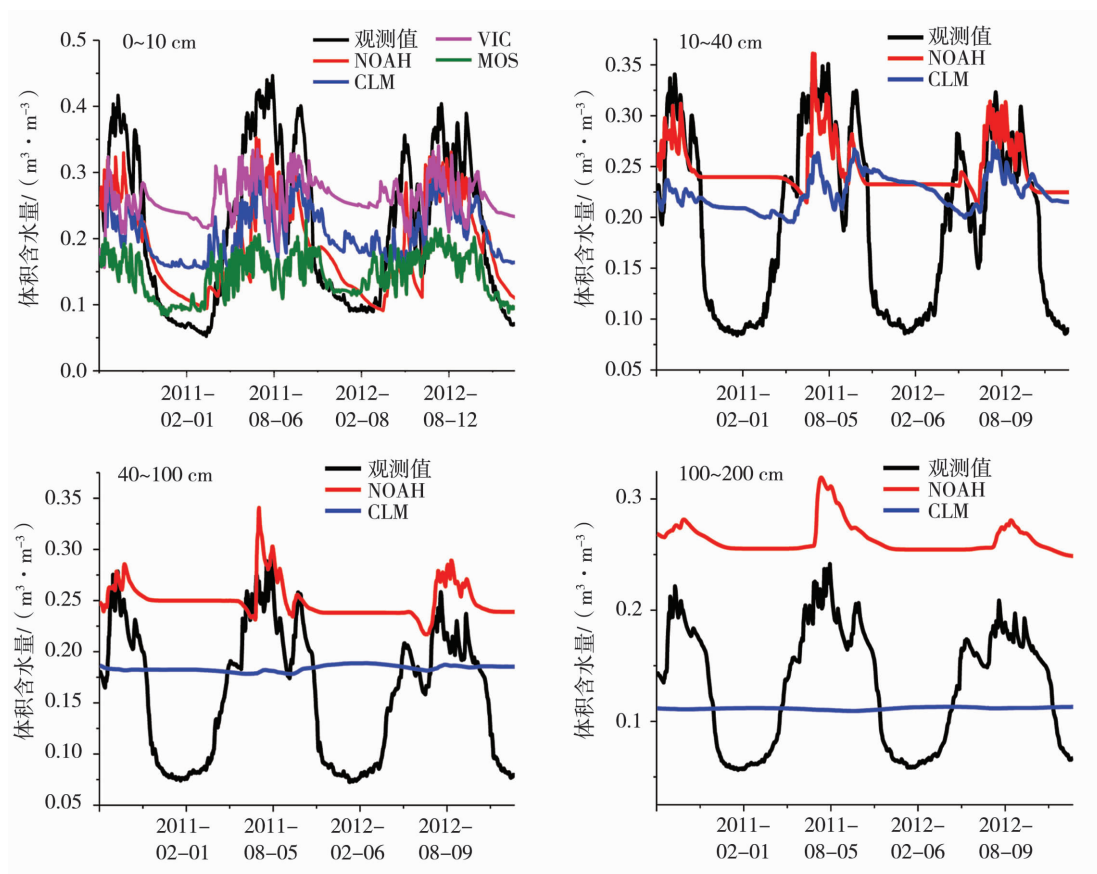


图3 那曲地区不同深度土壤湿度观测值与陆面模式模拟值随时间的演变

Fig. 3 The evolution of soil moisture observations and land surface model data at different depths in Naqu region

## 2.2 标准差

由于观测的土壤湿度在冰冻期间(11月至次年4月)只能测到土壤液态含水量,而GLDAS模式产品包含了液态和固态水,因此GLDAS土壤湿度产品不能反映冻融期间液态水的变化。因此对非冰冻期间(5—10月)的土壤湿度进行评估。表2为那曲地区4层土壤湿度观测值与GLDAS土壤湿度产品标准差,可以看出,浅层土壤湿度观测值与NOAH、CLM土壤湿度标准差相差较小。4层土壤湿度观测值与NOAH湿度资料标准差偏差均较小。图4为浅层土壤陆面模式资料与观测资料的Taylor图,可以看出NOAH陆面模式资料与观测资料浅层土壤湿度的相关系数最大,在0.6~0.7之间,与观测数据标准差的比率最大,其次是CLM陆面模式资料。

表2 那曲4层土壤湿度观测值与再分析资料标准差

Tab.2 The standard deviation values of observed soil moisture and the reanalysis data

| 土壤湿度层次/cm | 观测值   | NOAH  | CLM     | VIC   | MOSAIC |
|-----------|-------|-------|---------|-------|--------|
| 0~10      | 0.046 | 0.054 | 0.030 0 | 0.025 | 0.015  |
| 10~40     | 0.027 | 0.027 | 0.030 0 | —     | —      |
| 40~100    | 0.018 | 0.016 | 0.001 0 | —     | —      |
| 100~200   | 0.015 | 0.012 | 0.000 5 | —     | —      |

注:“—”表示不作计算,下同

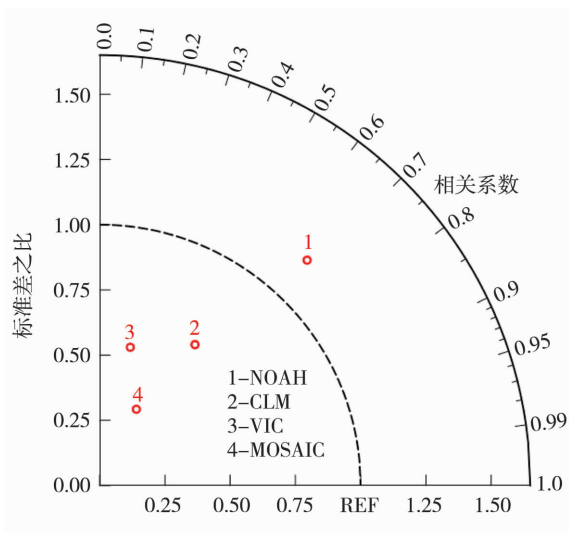


图4 陆面模式资料与观测资料浅层土壤 Taylor 图

Fig.4 The Taylor map of shallow soil moisture from models and observations

## 2.3 相关系数

表3列出了那曲地区5—10月4层土壤湿度与GLDAS土壤湿度资料的相关系数。可以看出在非冻融期间,NOAH陆面模式资料与四层土壤湿度观测值之间的相关均较好,CLM陆面模式与浅层土壤湿度观测值相关性较好,相关系数为0.56。

表3 那曲4层土壤湿度观测值与再分析资料的相关系数

Tab.3 Correlative coefficients between moisture observations and reanalysis data at four depths

| 土壤湿度层次/cm | NOAH  | CLM    | VIC   | MOSAIC |
|-----------|-------|--------|-------|--------|
| 0~10      | 0.677 | 0.560  | 0.216 | 0.436  |
| 10~40     | 0.736 | 0.510  | —     | —      |
| 40~100    | 0.730 | 0.154  | —     | —      |
| 100~200   | 0.744 | -0.700 | —     | —      |

综上所述,GLDAS四套陆面模式资料中,NOAH陆面模式资料在青藏高原的适用性较好,因此,本文基于NOAH陆面模式资料研究时间序列更长、空间范围更广的土壤湿度时空分布特征。

## 3 青藏高原地区土壤湿度时空分布

### 3.1 时间变化

图5为那曲区域平均土壤湿度(10个试验点土壤湿度做算术平均)随时间的演变规律。图6是青藏高原地区土壤湿度、降水量的月际变化。从图5可以看出青藏高原土壤湿度呈现明显的季节变化特征:一年之中,土壤湿度变化存在两个峰值和两

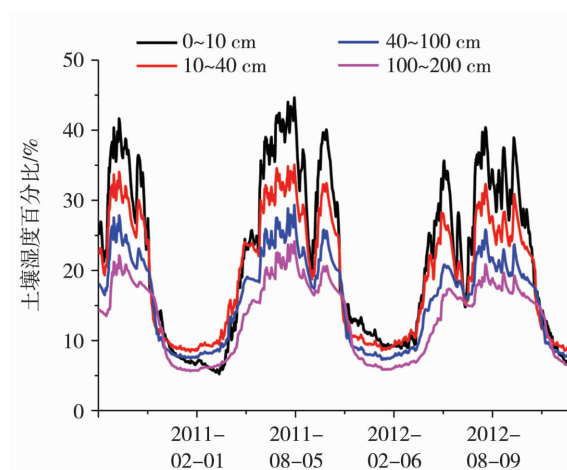


图5 那曲地区土壤湿度观测值随时间的变化

Fig.5 Changes of soil moisture observations in Naqu region



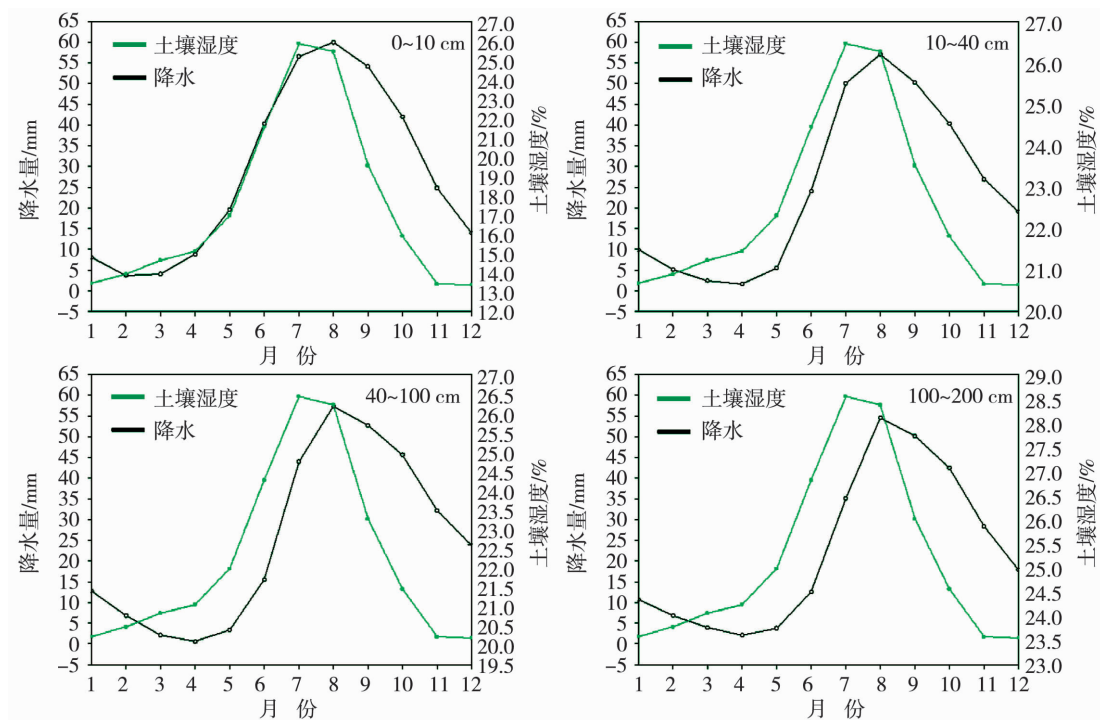


图6 青藏高原地区不同深度土壤湿度和降水量的月际变化

Fig. 6 Monthly variation of soil moisture at different depths and precipitation in the Tibetan Plateau

个低值阶段,7、8月由于降水增加会出现土壤湿度的第一个峰值。年平均降水在每年7月达到最大值,当降水量不断累积时,土壤湿度8月达到峰值,土壤湿度与降水呈现显著的正相关关系。同期土壤湿度与降水并不对应,存在明显的滞后特征,土壤湿度的变化滞后于降水约20 d。11月由于气温下降土壤冻结,为土壤湿度的第一个低值阶段;次年5月份由于温度升高,土壤冻结层融化,出现土壤湿度的第二个峰值;9月由于降水较少、温度较低,蒸发量加大,出现土壤湿度的第二个低值。不同层次土壤湿度值大小存在差异,但其随时间的变化规律基本一致。那曲地区土壤湿度浅层高湿、深层低湿,随着土壤深度的增加,土壤湿度变化梯度逐渐减小。

### 3.2 空间分布特征

图7是1980—2010年青藏高原多年平均土壤湿度空间分布。浅层土壤(0~10 cm)在青藏高原东南部区域土壤湿度值最大,高原西北部土壤湿度值最小。10~40 cm与40~100 cm土壤湿度的空间分布基本一致,土壤湿度在高原南部最大,高原北部最小,其空间分布呈现显著的纬向分布特征,随着纬度的升高,土壤湿度减小。深层土壤(100~200 cm)青藏高原中部土壤湿度最大,土壤湿度随着纬度的升高而减小。同时可以看出,相对于中间层和深层土壤,浅层土壤湿度较小。

### 3.3 趋势分析

图8是青藏高原土壤湿度趋势,青藏高原中部区域各层土壤湿度的变化趋势基本一致,均呈现增加趋势。浅层土壤湿度在青藏高原中部增加尤为明显,在边缘地区,土壤湿度有下降趋势。10~40 cm和40~100 cm土壤湿度在高原中部呈现明显增加趋势,在高原边缘区域土壤湿度呈现下降趋势。100~200 cm深度在青藏高原中部偏西地区,土壤湿度呈现下降趋势,在高原中部偏东南地区呈现增加趋势。

### 3.4 各层次土壤湿度时空分布特征

由于GLDAS模式产品包含了液态和固态水,不能反映冻融期间液态水的变化。因此研究青藏高原夏季(6—7月)土壤湿度的时空变化特征。将夏季土壤湿度数据做距平处理后,进行EOF分析,得到第一模态空间场和时间系数(图9)。0~10 cm土壤第一模态(EOF1)解释方差为0.294。EOF1空间场在青藏高原南部为正值,北部为负值,表明青藏高原土壤湿度变化在南北不一致。青藏高原中部为一绝对值较大的正值中心,对应该区域土壤湿度变化最敏感。第一模态对应的时间系数代表青藏高原地区第一模态表征的空间分布的时间变化特征。第一特征向量在高原南部均为负值,若年时间系数为正,表明土壤湿度距平值为负,该区域土壤湿度较低。

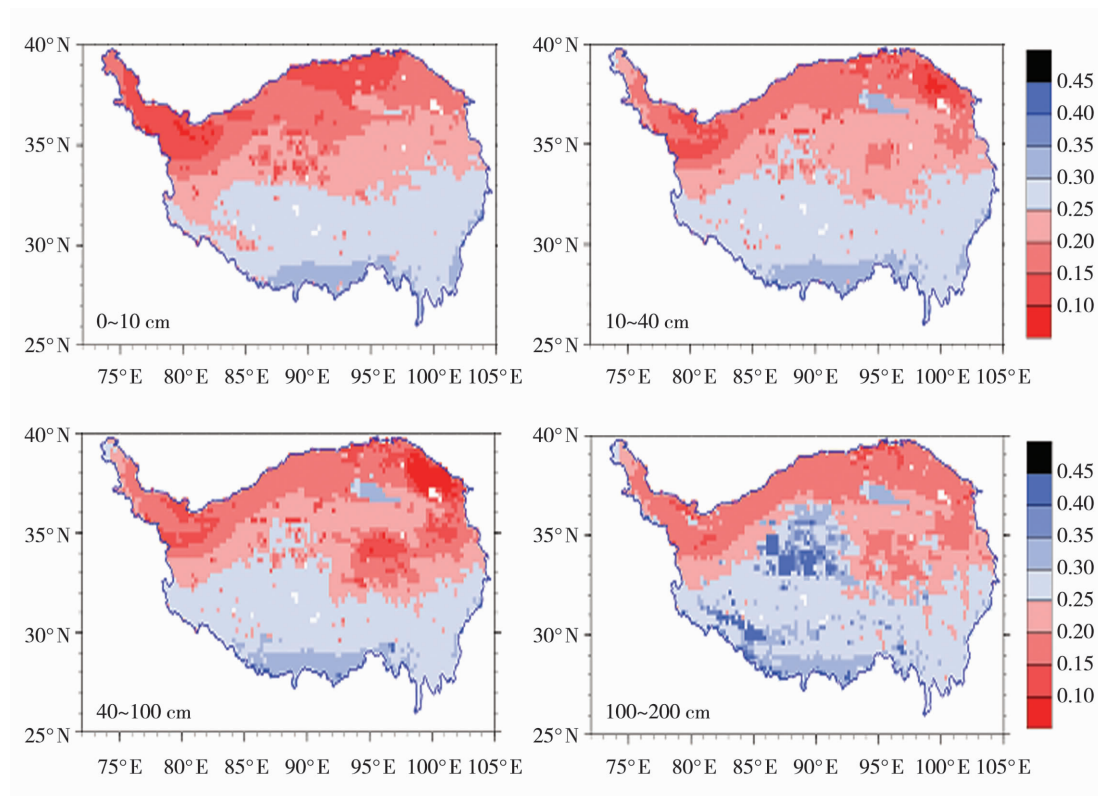


图7 青藏高原0~10 cm、10~40 cm、40~100 cm、100~200 cm  
多年平均土壤湿度空间分布(单位: $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ )

Fig. 7 The distribution of mean soil moisture at the depth of 0 – 10 cm, 10 – 40 cm, 40 – 100 cm and 100 – 200 cm over the Tibetan Plateau (Unit: $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ )

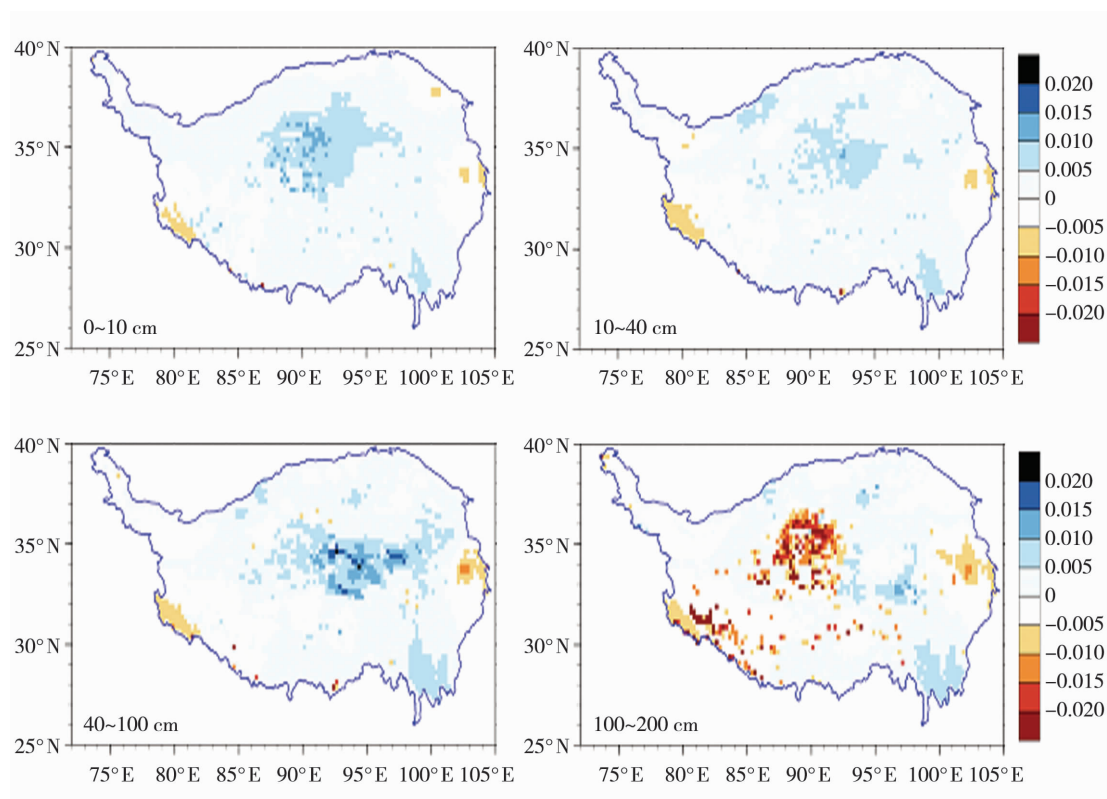


图8 青藏高原不同深度土壤湿度趋势[单位: $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ]

Fig. 8 Change trend of soil moisture at different depths over the Tibetan Plateau (Units: $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ )

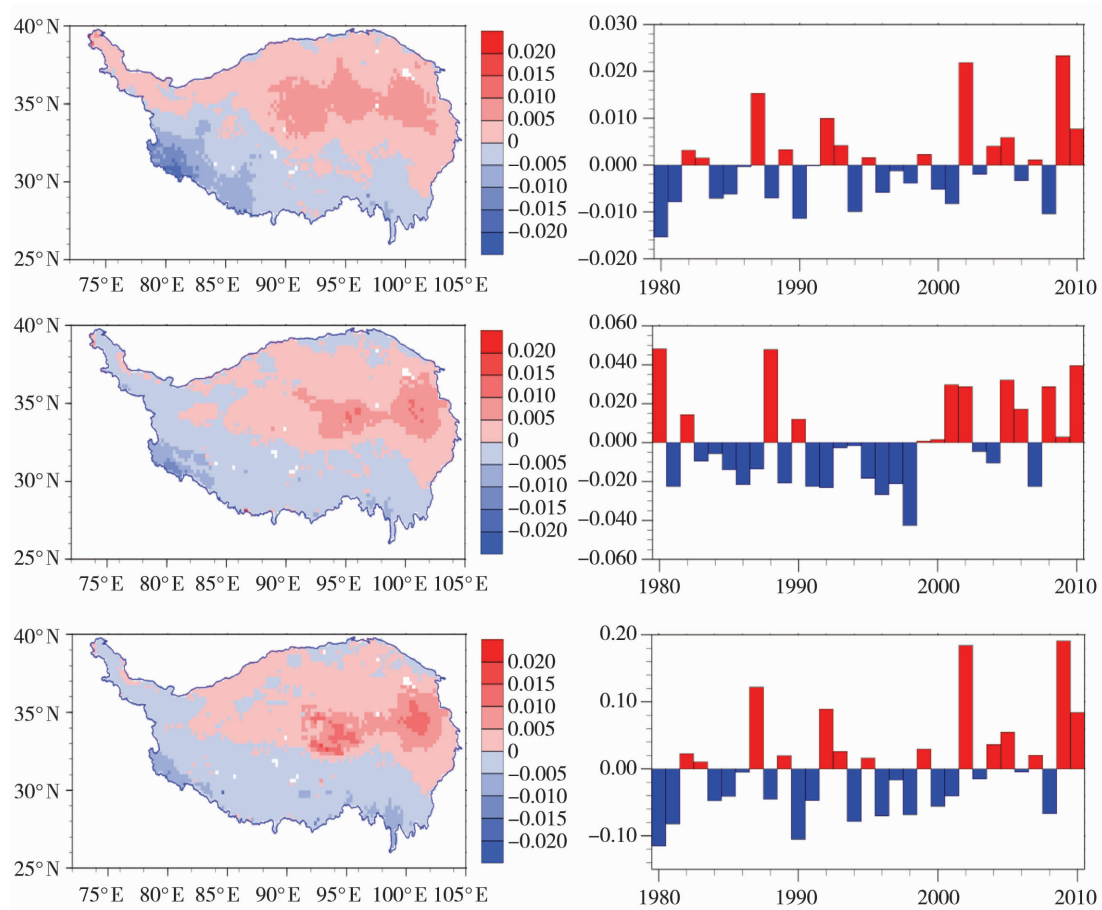


图9 0~10 cm(上)、10~40 cm(中)、40~100 cm(下)土壤湿度 EOF

展开的第一模态(EOF1)空间型(左)及相应的时间系数(右)序列

Fig.9 The EOF1 spatial pattern (the left) and time coefficient (the right) of soil moisture at the depth of 0-10 cm (the top), 10-40 cm (the middle), 40-100 cm (the bottom)

第一特征向量在高原北部均为正值,若年时间系数为正,表明土壤湿度距平值为正,该区域土壤湿度值较高。由图9可以看出1979—2002年时间系数多为负值,在2002年以后时间系数多为正值,说明2002年之前,高原北干南湿。

10~40 cm 土壤 EOF 展开第一模态(EOF1)解释方差为0.367。10~40 cm 土壤 EOF1 空间场和对应的时间场分布与0~10 cm 土壤基本一致。

40~100 cm 土壤 EOF 展开第一模态(EOF1)解释方差为0.357。40~100 cm EOF1 空间场和对应的时间系数分布与0~10 cm 土壤基本一致。由于NOAH 土壤湿度数据在深层土壤适用性较差,故不对深层土壤做分析。

## 4 结 论

(1)通过对比分析GLDAS 四套陆面模式资料与科考所得的那曲地区10个试验点的土壤湿度数据,发现NOAH 陆面模式资料在青藏高原地区适用

性较好。

(2)根据科考所得的那曲站10个试验点的土壤湿度资料得出青藏高原中部的那曲地区土壤湿度有明显的季节变化规律,不同深度土壤湿度各有不同,浅层土壤湿度较大,中间层次之,深层最小,并且随土壤深度的增加,土壤湿度变化梯度减小,得出深层土壤湿度变化较小。虽然不同层次土壤湿度各有不同,但其随时间的变化规律基本一致,在一年之中,土壤湿度会出现两个峰值和两个低值阶段。基于NOAH 陆面模式资料得到青藏高原土壤湿度的空间分布呈现明显的纬向分布特征,随着纬度的升高,土壤湿度变小。同时,可以看出青藏高原中部浅层土壤和中间层土壤有变湿趋势。

(3)基于NOAH 陆面模式资料对青藏高原土壤湿度进行EOF 分析得到0~10 cm、10~40 cm、40~100 cm 土壤 EOF1 的空间场和时间系数分布基本一致。EOF1 空间场在青藏高原南部为正值,北部为负值,表明青藏高原土壤湿度变化南北不一致。青

藏高原中部为一绝对值较大的正值中心,对应区域土壤湿度变化最敏感。1979—2002 年时间系数多为负值,2002 年以后时间系数多为正值,说明 2002 年之前,高原北干南湿。

#### 参考文献:

- [1] 卓嘎,陈涛,周刊社,等. 2009—2010 年青藏高原土壤湿度的时空分布特征[J]. 冰川冻土,2015,37(3):625—634.
- [2] 马思源,朱克云,李明星,等. 中国区域多源土壤湿度数据的比较研究[J]. 气候与环境研究,2016,21(2):121—133.
- [3] 叶笃正,高由禧. 青藏高原气象学[M]. 北京:科学出版社,1979.
- [4] 刘川,余晔,解晋,等. 多套土壤温湿度资料在青藏高原的适用性[J]. 高原气象,2015,34(3):653—665.
- [5] 韦志刚,陈文,黄荣辉. 青藏高原冬春积雪异常影响中国夏季降水的数值模拟[J]. 高原山地气象研究,2008,28(1):1—7.
- [6] 范广洲,华维,黄先伦,等. 青藏高原植被变化对区域气候影响研究进展[J]. 高原山地气象研究,2008,28(1):72—80.
- [7] 段安民,肖志祥,吴国雄,等. 青藏高原冬春积雪影响亚洲夏季风的研究进展[J]. 气象与环境科学,2014,37(3):94—101.
- [8] 李国平. 高原涡、西南涡研究的新进展及有关科学问题[J]. 沙漠与绿洲气象,2013,7(3):1—6.
- [9] 左志燕,张人禾. 中国东部春季土壤湿度的时空变化特征[J]. 地球科学,2008,38(11):1428—1437.
- [10] 栾澜,孟宪红,吕世华,等. 青藏高原一次对流降水模拟中边界层参数化和云微物理的影响研究[J]. 高原气象,36(2):283—293.
- [11] 胡豪然. 青藏高原东部积雪异常与西南地区春季降水的关系[J]. 干旱气象,2016,34(3):423—430.
- [12] 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[J]. 大气科学,2008,32(13):591—597.
- [13] CHEN Y Y, YANG K, QIN J, et al. Evaluation of AMSR—E retrievals and GLDAS simulations against observations of a soil moisture network on the central Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2013,118,4466—4475.
- [14] MENG X H, LI R Q, LUAN L. Detecting hydrological consistency between soil moisture and precipitation and changes of soil moisture in summer over the Tibetan Plateau[J]. Climate Dynamics, 2017, DOI:10.1007/s00382-017-3646-5.
- [15] 李瑞青,吕世华,韩博,等. 青藏高原东部三种再分析资料与地面气温观测资料的对比分析[J]. 高原气象,2012,31(6):1488—1502.
- [16] 沈丹,王磊. 青藏高原土壤湿度对中国夏季降水与气温影响的敏感试验[J]. 成都信息工程大学学报,2015,43(6):1096—1120.
- [17] 龚斌,甘小莉,刘伟玲,等. 基于 EOF 分析的三江源区植被覆盖变化时空分布特征[J]. 地学前缘,2013,20(3):234—239.
- [18] 高文良,陈忠明,闵文彬. 青藏高原冬季积雪时空变化特征 EOF 分析[J]. 四川气象,2004,24(3):7—10.

## Analysis on Soil Moisture Characteristics of Tibetan Plateau Based on GLDAS

DENG Mingshan<sup>1,2</sup>, MENG Xianhong<sup>1,2</sup>, MA Yingsai<sup>1,2</sup>, AN Yingying<sup>1,2</sup>

(1. Northwest Institute of Eco—Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences,  
Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change  
in Cold and Arid Regions of Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In this paper, the soil moisture data from ten test sites in the Naqu region of the central Tibetan Plateau from August 2010 to December 2012 were compared with four sets of GLDAS (global land data assimilation system) products (NOAH, CLM, VIC, MOSAIC) and it was found that NOAH land surface model data has good applicability in the Tibetan Plateau. The spatial and temporal distribution characteristics of soil moisture at different depths in the Tibetan Plateau were studied using the soil moisture data from observations and the GLDAS land surface model data over a long period of time. The results show that the soil moisture in Naqu showed a significant seasonal variation with two peaks and two low—value phases in one year. Based on the NOAH land surface data assimilation product, the spatial distribution of soil moisture in the Tibetan Plateau presented obvious zonal distribution characteristics. With the increase of latitude, the soil moisture decreased. At the same time, the humidity in the shallow soil and the middle layer in the central Tibetan Plateau tended to become wetter. EOF1 spatial pattern of soil moisture at the depth of 0—10 cm, 10—40 cm, 40—100 cm showed the north—south antiphase variation.

**Key words:** soil moisture; Tibetan Plateau; GLDAS; spatial and temporal distribution