

# 近50年中国北方土壤湿度时空变化特征及未来预估

赵云潇, 钱澄知, 施红霞

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2021年10月20日; 录用日期: 2021年11月19日; 发布日期: 2021年11月26日

## 摘要

基于1960~2010年GLDAS的土壤湿度数据和GPCP月降水数据, 分析了近50年中国北方四层(0~10 cm, 10~40 cm, 40~100 cm, 100~200 cm)土壤湿度的时空变化特征, 并讨论了土壤湿度变化与降水之间的关系, 进一步, 运用CSIRO-mk3.6.0模式在RCP4.5和RCP8.5排放情景下的数据, 对2020~2100年中国北方土壤湿度的变化进行预估。结果表明: 1) 近50年中国西北地区土壤湿度正在逐渐增大, 但是这种增加的趋势随着土壤深度的加深而逐渐减小。华北大部分地区、内蒙古中东部、中国东北的大部分地区土壤湿度则逐渐下降; 2) 0~10 cm土壤湿度与降水存在显著的正相关, 随着土壤深度的加深, 土壤湿度与降水之间的关系逐渐减弱, 甚至到40 cm以下, 土壤湿度与降水的关系由正相关转变为负相关。3) 在RCP4.5和RCP8.5两种排放情景下2020~2100年中国西北地区如新疆、甘肃西部土壤湿度处于上升趋势, 而华北、内蒙古东部、东北地区土壤湿度将处于下降趋势。随着排放浓度的增加, 新疆等地土壤湿度增加的强度增大, 而内蒙、东北等地土壤湿度则由减少逐渐转变为弱增加。总的来说, 从区域平均来看, 相对于1986~2005年, 中国北方土壤湿度将呈现出减少的趋势。

## 关键词

中国北方, 土壤湿度, 降水, 时空变化, 预估

## Temporal and Spatial Variation Characteristics of Soil Moisture in North China in Recent 50 Years and Its Future Prediction

Yunxiao Zhao, Chengzhi Qian, Hongxia Shi

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: Oct. 20<sup>th</sup>, 2021; accepted: Nov. 19<sup>th</sup>, 2021; published: Nov. 26<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Based on the soil moisture data from GLDAS and precipitation data from GPCP during 1960~2010, the temporal and spatial variation characteristics of soil moisture in four layers (0~10 cm, 10~40 cm, 40~100 cm, 100~200 cm) of Northern China in recent 50 years were analyzed, and the relationship between soil moisture and precipitation was discussed. Further, based on the data of CSIRO-mk3.6.0 model under RCP4.5 and RCP8.5 emission scenarios, the change of soil moisture during 2020~2100 is projected. The results show that: 1) The soil moisture in Northwest China was increasing gradually in recent 50 years, while it declined gradually in most parts of North China, Middle East of Inner Mongolia and Northeast China; 2) The soil moisture in the depth of 0~10 cm had a significantly positive correlation with precipitation, as the soil deepens, the correlation between soil moisture and precipitation gradually became weak, even below 40 cm, the correlation became negative correlation from positive correlation; 3) Under the two emission scenarios RCP4.5 and RCP8.5, soil moisture has an increasing trend during 2020~2100 in Xinjiang and the western part of Gansu, while it will decline in North China, Eastern Inner Mongolia and Northeastern China. As the emission concentration rises, soil moisture becomes more in Xinjiang and the western part of Gansu, but the soil moisture in Inner Mongolia and Northeast China will change from decreasing to weak increasing. In general, relative to the period of 1986~2005, soil moisture in Northern China will display a decreasing trend on regional average.

## Keywords

Northern China, Soil Moisture, Precipitation, Temporal and Spatial Variation, Projection

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

土壤湿度作为陆面过程中的重要参量,通过改变地表反照率、土壤热容量、感热、潜热,进而对气候产生重要影响[1]。土壤湿度极大地影响着环境变迁与天气、气候变化,与人类的生产生活息息相关。土壤湿度对地表最直接的影响就是改变地表反照率、土壤热容量,影响地表植物生长,从而进一步影响地表的反照率、蒸发量,从而对气候造成影响。因此,土壤湿度一直是研究干旱和气候变化的一个客观定量的综合指标[2]。

较多学者以土壤湿度作为指标在干旱方面已经做了较多工作。Wang *et al.* [3]利用多模式集合土壤湿度指标分析了 1950~2006 年中国土壤干旱的时空变化,结果表明过去 57 年总体上中国干旱事件的强度、持续时间和发生频率呈增强趋势。遥感反演地表土壤湿度和 PDSI 指数分析显示,西北干旱区和东南湿润区自 1980 年代中期出现了暖干-冷湿的转变趋势,土壤干旱与气温存在密切的年代尺度的协同变化和相互作用[4] [5]。由此可以看出,土壤湿度能够再现历史观测的干旱事件。我国的干旱半干旱区域面积广泛,已经占国土总面积的 56%,主要集中在我国北方地区,其中 40%已经向着干旱区发展。这已经严重阻碍了中国的生态环境建设以及经济发展[6]-[11]。由于全球变暖的因素,地表水分蒸发比以往更加严重,加上人类活动造成的植被破坏,蒸发量进一步增大。同时,对地下水的过度开采也导致了土壤水分的加速流失。近 50 年,我国北方地区干旱半干旱化已经成为我国的一个重大环境问题,我国为此特别设立了由国家重点关注的基础性气候研究发展的规划性项目“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究”[12]。

我国干旱半干旱区的土壤湿度研究形势严峻、刻不容缓。

研究土壤湿度的方法主要包括地面观测、卫星遥感和数值模拟等[13]。这其中地面观测是最早展开的土壤湿度研究方法，同时，地面观测也是检验卫星遥感和数值模拟结果的关键手段[13]。为了研究土壤水分的时空变化，需要大量的，长达几十年的数据资料，遥感观测虽然有非常高的空间优势——可以全球覆盖，但是其对算法有着非常大的依赖性，并且无法演算出更深层的土壤湿度[14]。这将大大影响对土壤湿度的深层次研究。故土壤湿度资料的短缺，是制约围绕土壤湿度展开的一系列陆气相互作用研究的最大因素。为了克服这一不足，并随着卫星技术的不断发展，近年来建立起了全球高分辨率的陆面同化系统，其核心的 GLDAS (Global Land Data Assimilation System)指的是利用气象卫星和地面观测数据，再利用先进的陆面模式和数据同化技术，从而得到了最好的地表状态以及较为精确的通量数据，是土壤湿度研究的可靠数据来源[14]。因此，本文利用具有高分辨率的 GLDAS 土壤湿度资料，对中国北方土壤湿度的时空变化特征进行了分析，并讨论了土壤湿度与降水的关系，进一步对 2020~2100 年我国北方土壤湿度的变化进行了预估，这将对研究我国北方干旱方面的工作有一定的指导意义。

## 2. 资料与方法

### 2.1. 资料

本文利用了 GLDAS (Global Land Data Assimilation System) 1960~2010 年的土壤湿度的逐月资料，GPCC (Global Precipitation Climatology Centre)逐月的降水资料。其中 GLDAS 土壤湿度资料包括四层，分别是 0~10 cm, 10~40 cm, 40~100 cm, 100~200 cm。将 0~10 cm 称为浅层，10~100 cm 称为中层，100~200 cm 称为深层。

本文还使用了 CMIP5 中 CSIRO-mk3.6.0 模式在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种排放情景下的土壤湿度资料。

由于再分析资料、同化资料与模式资料的分辨率不同，本文采用双线性插值将所有资料统一插值到  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  的网格上。

### 2.2. 方法

#### 1) 线性回归[15]

运用最小二乘法拟合线性趋势变化，公式为：

$$y = a + bx \quad (1)$$

式中， $b$  为倾向率， $y$  为土壤湿度， $x$  为时间， $a$  为常数。当  $b > 0$  时，表示土壤湿度在增加；当  $b < 0$  时表示土壤湿度在减少。 $b$  值的大小反映了土壤湿度增加或者减少的强度。

#### 2) 相关系数[15]

$$P_{xy} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{D(x)}\sqrt{D(y)}} \quad (2)$$

其中， $x$  为土壤湿度， $y$  为温度或者降水， $P_{xy}$  为  $x$  与  $y$  之间的相关系数。 $P_{xy}$  为正值，说明土壤湿度与温度或者降水之间呈正相关， $P_{xy}$  为负值，说明土壤湿度与温度或者降水之间呈负相关， $P_{xy}$  绝对值越大，说明土壤湿度与温度或者降水之间正相关或者负相关关系越强。

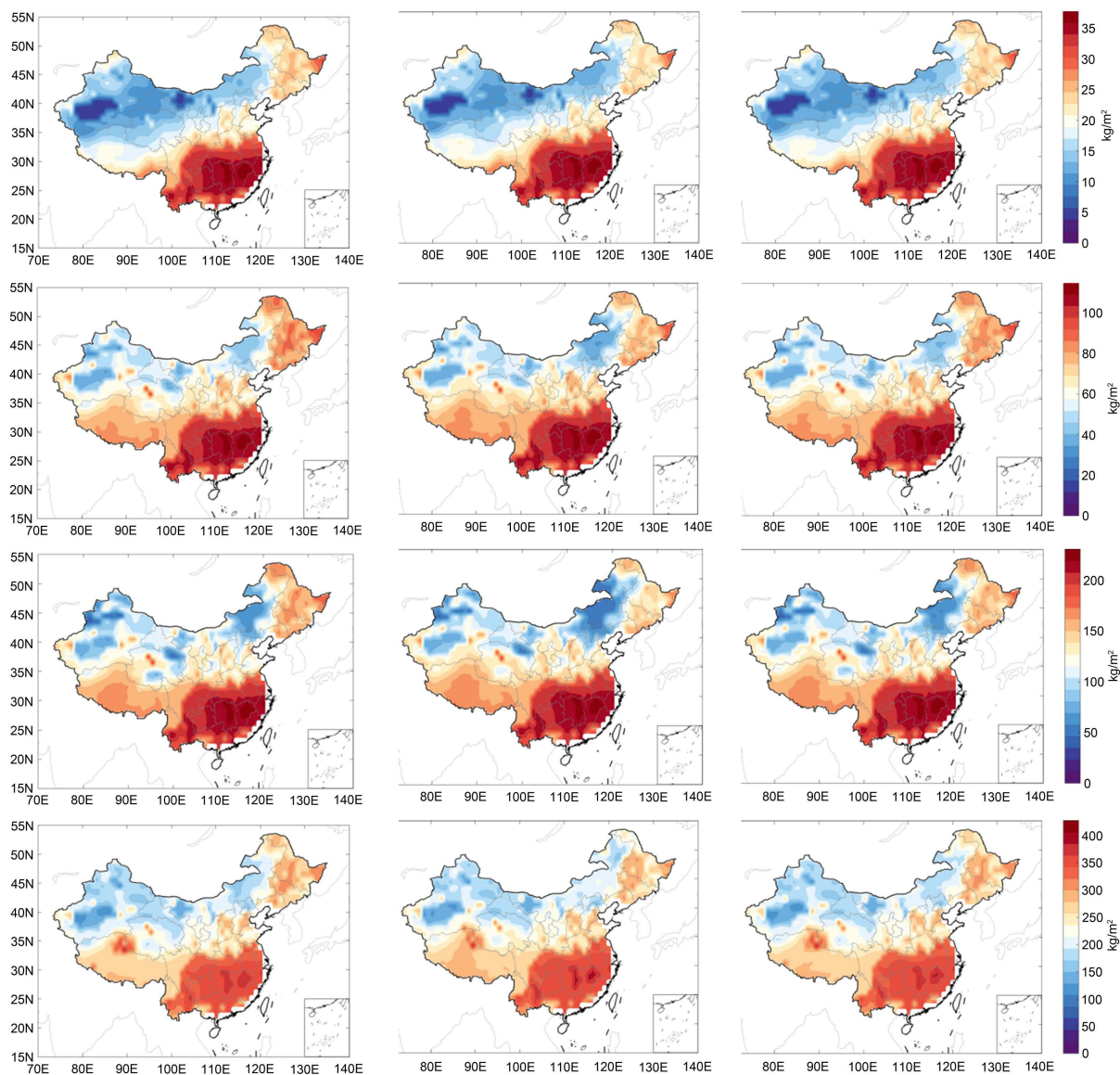
## 3. 近 50 年中国土壤湿度的时空变化特征

### 3.1. 不同时段土壤湿度的空间分布特征

马柱国等[7]认为 PDO 相位转变会对中国的降水格局造成影响，具体影响为，中国南部降水减少而北部降水增多；中国东部降水减少而西部增多。在 2000 年 PDO 发生了一次相位的转变，这是否会引起中

国土湿度的空间格局的转变呢? 为此, 本文把 1960~2010 年分成三个时段进行对比, 三个时段分别为 1960~2000 年, 2001~2010 年, 1960~2010 年。

图 1 中可以看出中国区域土壤浅层(0~10 cm), 西北、华北和东北部分地区土壤处于相对干旱状态, 35°N 以南以及 100°E 以东地区土壤处于相对湿润状态。然而随着土壤深度的增加, 各地区土壤含水量也在逐步增加, 但 35°N 以南以及 100°E 以东地区土壤湿度依旧明显要高于同一深度下全国其他地区。



**Figure 1.** The spatial distribution of annual mean soil moisture (The three columns indicate three periods of 1960~1999, 2000~2010 and 1960~2010; the four rows mean four soil depths: 0~10 cm, 10~40 cm, 40~100 cm and 100~200 cm)

**图 1.** 多年年平均土壤湿度的空间分布(三列分别是三个时间段: 1960~1999 年, 2000~2010 年和 1960~2010 年; 四行分别是四层土壤深度: 0~10 cm, 10~40 cm, 40~100 cm, 100~200 cm)

分析不同时段(1960~1999 年, 2000~2010 年)中国土壤湿度年平均分布状况, 可以明显的发现在 0~40 cm 深度下, 在 35°N 以南以及 100°E 以东的地理范围内, 2000~2010 年时段的中国区域年平均土壤湿度要略微高于 1960~1999 年时段; 但是在 35°N 以北以及 100°E 以西的地理范围内, 0~40 cm 深度下, 内蒙古东部以



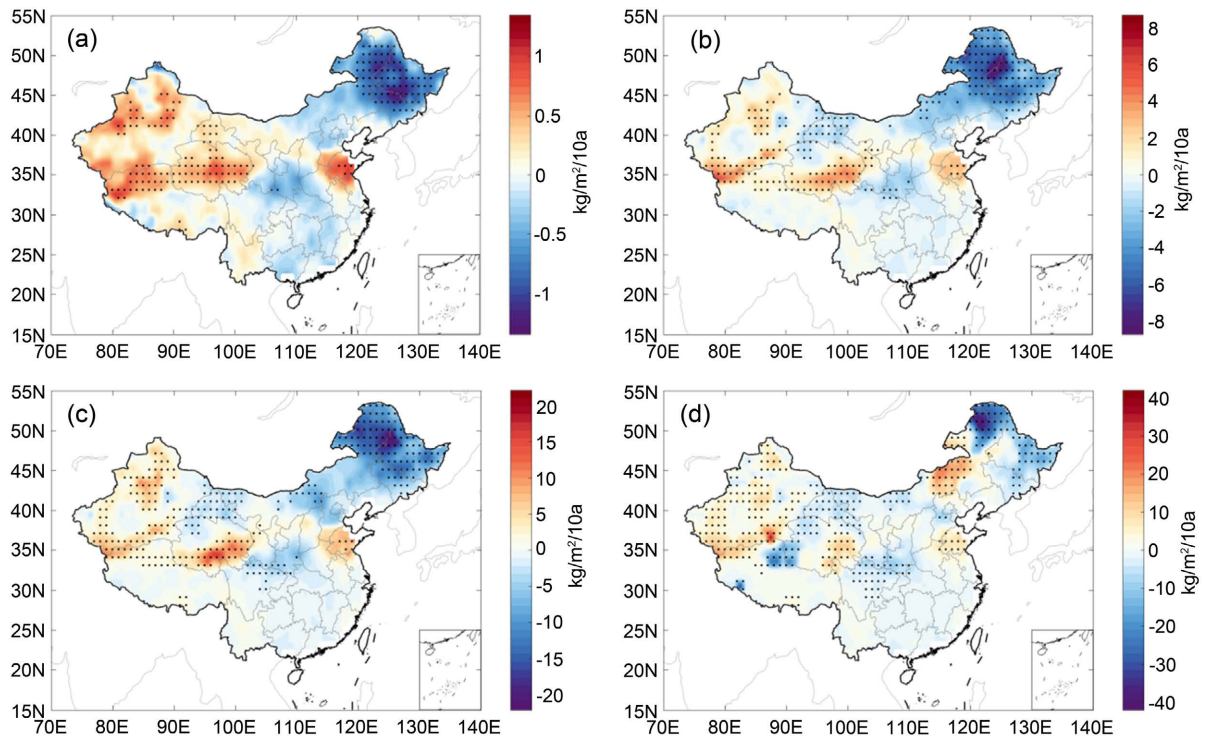
及西藏地区 2000~2010 年平均湿度要高于 1960~1999 年平均, 然而在新疆、甘肃、青海、黑龙江地区 2000~2010 年平均土壤湿度要低于 1960~1999 年平均值。

随着深度的增加, 在 40~200 cm 深度下, 土壤湿度的分布状况变化则更加明显。35°N 以南以及 100°E 以东范围内 2000~2010 年时段的年平均土壤湿度整体高于 1960~1999 年时段; 35°N 以北以及 100°E 以西范围内, 40~100 cm 深度下内蒙古东部地区土壤湿度增大相对浅层更加明显; 然而在 100~200 cm 深度下, 内蒙古东部、黑龙江、青海、新疆、甘肃地区湿度均处于下降态势。但在西藏地区, 在 40~200 cm 深度范围下土壤湿度均处于上升趋势。

由此可见, 在 2000 年 PDO 发生了相位转变, 我国土壤湿度空间分布格局变化不明显。

### 3.2. 土壤湿度线性趋势空间分布

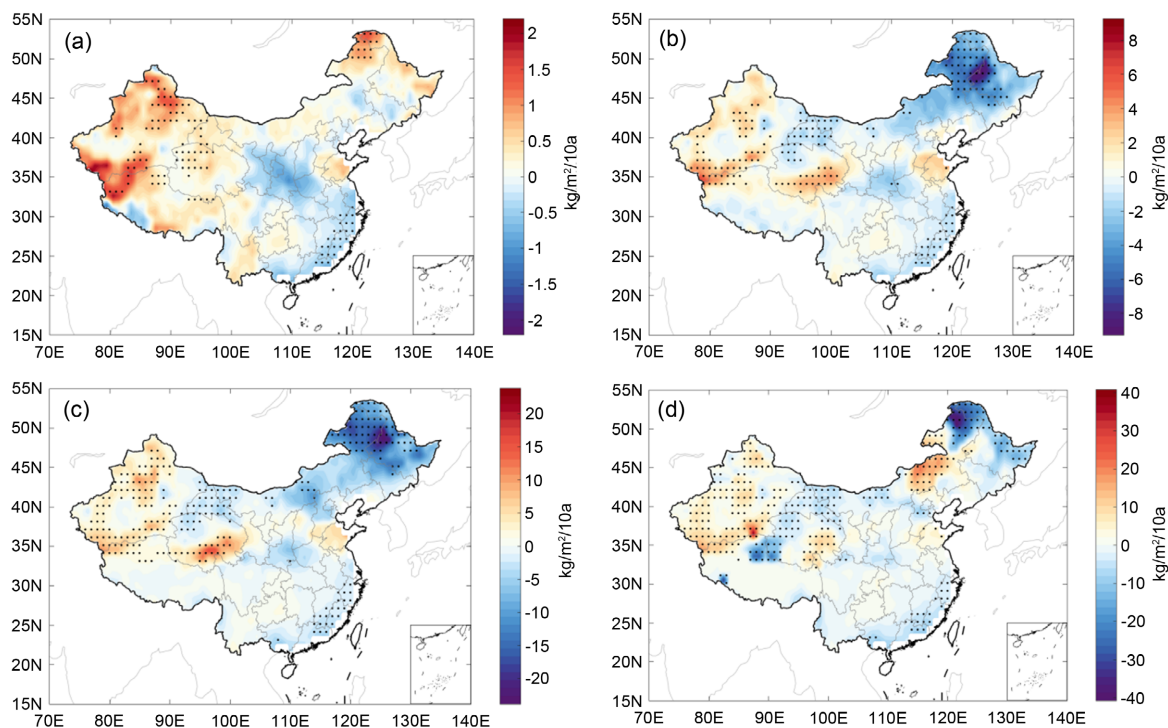
从四层土壤湿度的线性趋势的空间分布可以看出(图 2), 35°N 以北的干旱以及半干旱地区土壤湿度变化较为明显, 其中东北地区土壤湿度处于下降趋势, 而在青海中部、新疆大部分地区土壤湿度处于上升趋势, 而且从浅层到深层, 土壤湿度增加或减少的趋势都在增强。也就是说, 1960~2010 年从浅层到深层东北地区土壤越来越干, 而以新疆为主的大部分干旱区土壤却存在变湿的趋势。



**Figure 2.** The spatial distribution of linear trend of soil moisture during 1960~2010 ((a) 0~10 cm, (b) 10~40 cm, (c) 40~100 cm, (d) 100~200 cm; the black dot indicates the trend passes the 95% significance test)

**图 2.** 1960~2010 年土壤湿度线性趋势空间分布((a) 0~10 cm, (b) 10~40 cm, (c) 40~100 cm, (d) 100~200 cm; 黑点区域表示趋势通过 95%显著性检验)

从图 3 可以看出, 35°N 以北的中国干旱以及半干旱地区, 山东半岛、青海东部以及新疆西部地区在 0~200 cm 深度下春季土壤湿度均表现出上升趋势, 华北平原地区在各深度下表现出一定的下降趋势; 黑龙江以及内蒙古东部地区, 在 0~10 cm 深度下春季土壤湿度表现出一定的上升趋势, 而在 10~200 cm 深度下春季土壤湿度则表现出较为明显的下降趋势。

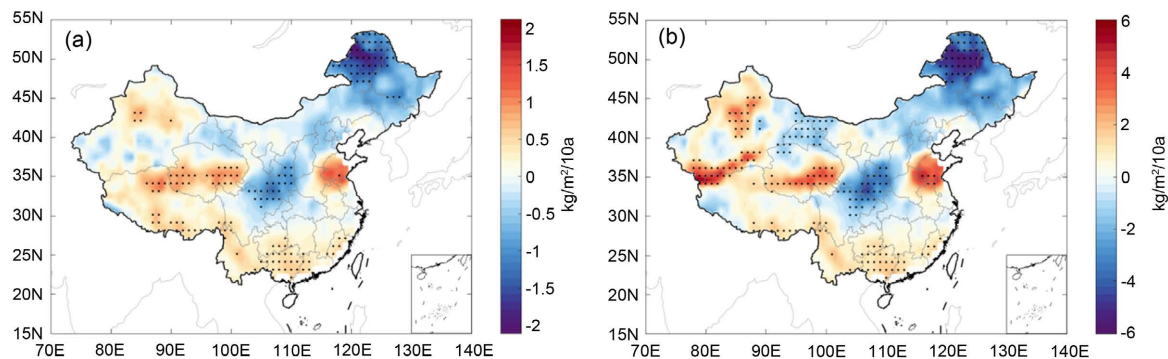


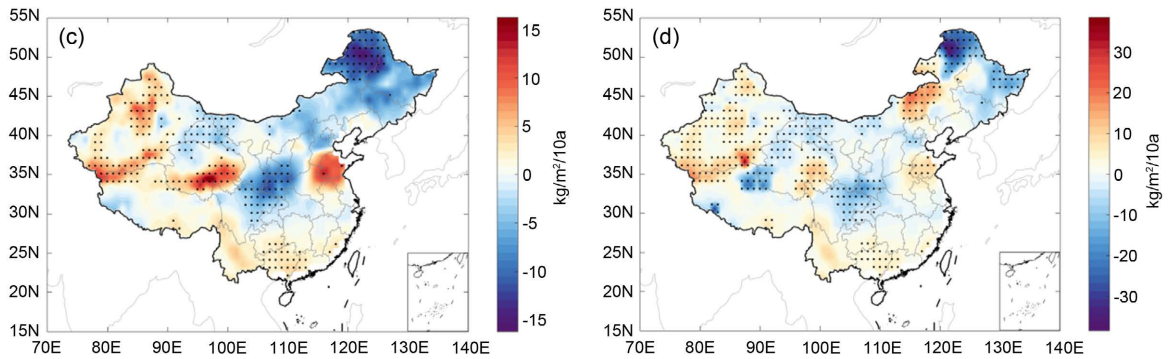
**Figure 3.** The spatial distribution of linear trend of soil moisture in spring during 1960~2010 ((a) 0~10 cm, (b) 10~40 cm, (c) 40~100 cm, (d) 100~200 cm; the black dot indicates the trend passes the 95% significance test)

**图 3.** 1960~2010 年春季土壤湿度线性趋势空间分布((a) 0~10 cm, (b) 10~40 cm, (c) 40~100 cm, (d) 100~200 cm; 黑点区域表示趋势通过 95% 显著性检验)

由图 4 可得, 35°N 以北的中国干旱以及半干旱区域, 华北地区山东半岛夏季土壤湿度在 0~200 cm 深度范围内处于较为明显的上升趋势, 然而在华北其他地区例如河北北部、山西、陕西以及东北地区在 0~200 cm 范围内均处于下降趋势; 西部地区, 青海以及新疆的北部、西南部地区在 0~200 cm 范围内土壤湿度夏季处于上升趋势, 而在内蒙古西部相对较小的一片区域内, 土壤湿度夏季处于降低趋势。

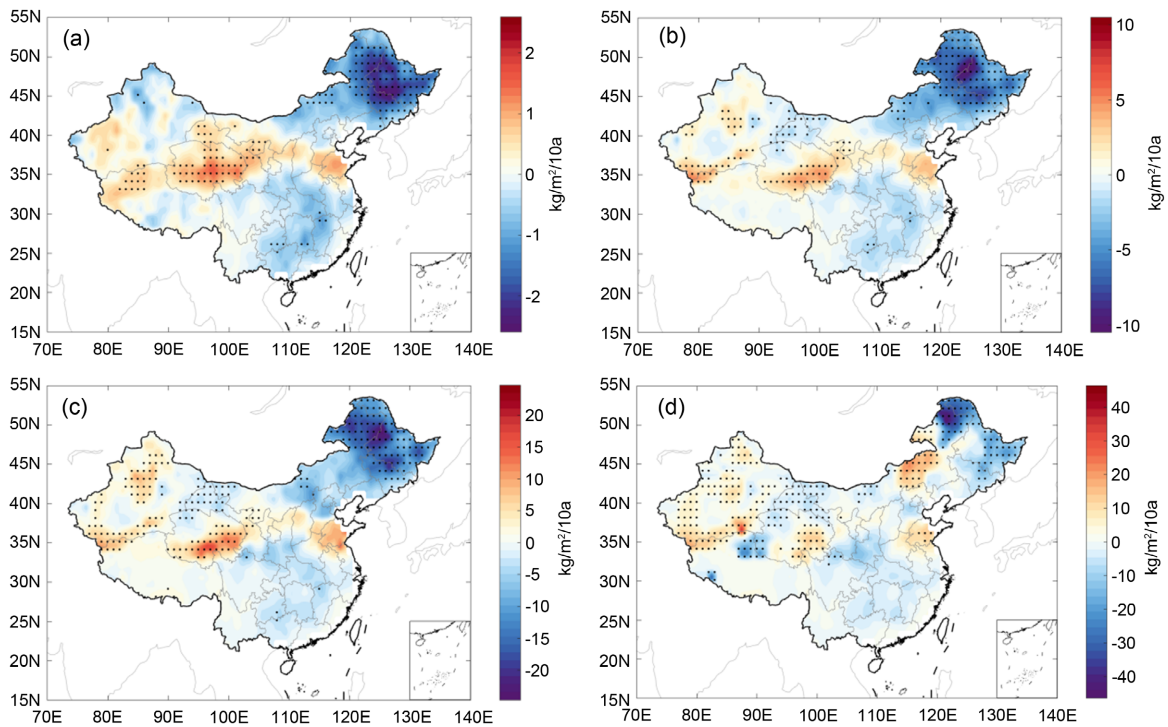
由图 5 可得, 35°N 以北的中国干旱及半干旱区域, 内蒙古东部以及东北地区秋季土壤湿度总体处于较为明显的下降趋势; 山东半岛、青海、新疆中西部地区秋季土壤湿度总体处于上升趋势, 甘肃西部、新疆北部地区在 0~10 cm 深度范围内秋季土壤湿度处于上升趋势, 在 10~200 cm 深度范围均处于下降趋势; 内蒙古东部地区, 只有在 100~200 cm 深度范围内秋季土壤湿度处于上升趋势, 而在 0~100 cm 深度范围内则处于下降趋势。





**Figure 4.** The spatial distribution of linear trend of soil moisture in summer during 1960~2010 ((a) 0~10 cm, (b) 10~40 cm, (c) 40~100 cm, (d) 100~200 cm; the black dot indicates the trend passes the 95% significance test)

**图 4.** 1960~2010 年夏季土壤湿度线性趋势空间分布((a) 0~10 cm, (b) 10~40 cm, (c) 40~100 cm, (d) 100~200 cm; 黑点区域表示趋势通过 95%显著性检验)



**Figure 5.** The spatial distribution of linear trend of soil moisture in autumn during 1960~2010 ((a) 0~10 cm, (b) 10~40 cm, (c) 40~100 cm, (d) 100~200 cm; the black dot indicates the trend passes the 95% significance test)

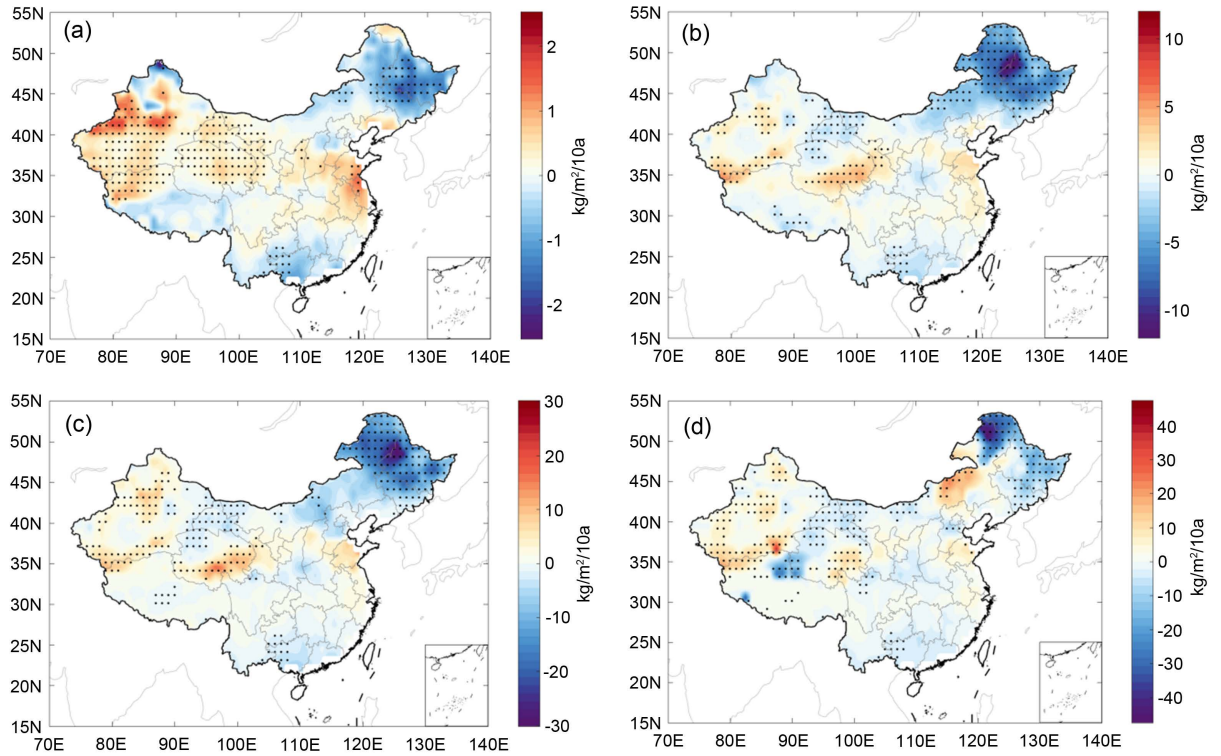
**图 5.** 1960~2010 年秋季土壤湿度线性趋势空间分布((a) 0~10 cm, (b) 10~40 cm, (c) 40~100 cm, (d) 100~200 cm; 黑点区域表示趋势通过 95%显著性检验)

由图 6 可得, 35°N 以北的中国干旱以及半干旱地区, 东北地区冬季土壤湿度总体处于较为明显的下降趋势; 而在山东半岛、新疆西北部、青海地区冬季土壤湿度整体处于上升趋势; 新疆北部小部分区域在 0~10 cm 深度范围内冬季土壤湿度处于降低趋势, 而在 10~200 cm 深度范围内都处于上升趋势; 内蒙古东部地区仅在 100~200 cm 深度范围内处于上升趋势, 而在较浅层的 0~100 cm 深度范围内均处于下降趋势。

综合图 3~6, 可以发现 35°N 以北中国干旱半干旱区, 新疆西北部、青海、山东半岛地区土壤湿度在 1960~2010 年总体处于一个上升趋势, 而在东北地区(黑龙江、吉林)地区土壤湿度在 1960~2010 年总体处



于一个下降趋势，而在中国北方其他地区土壤湿度不同深度变化不明显。

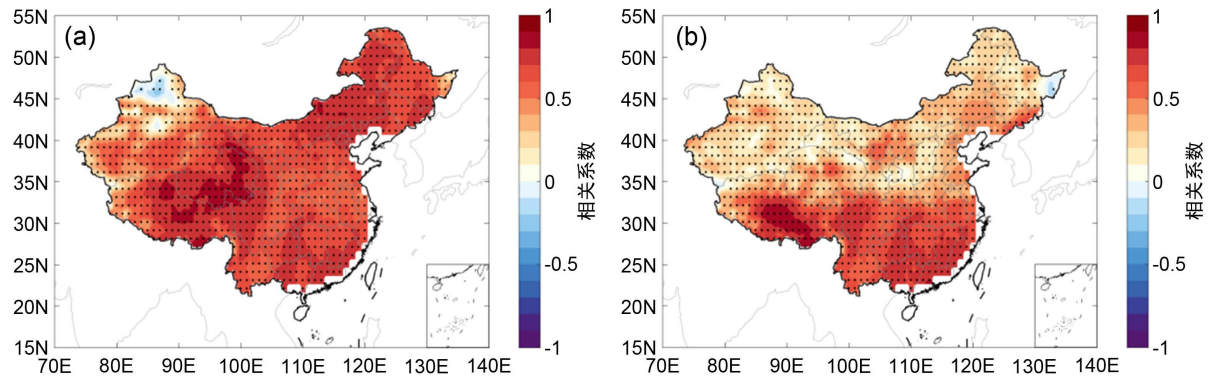


**Figure 6.** The spatial distribution of linear trend of soil moisture in winter during 1960~2010 ((a) 0~10 cm, (b) 10~40 cm, (c) 40~100 cm, (d) 100~200 cm; the black dot indicates the trend passes the 95% significance test)

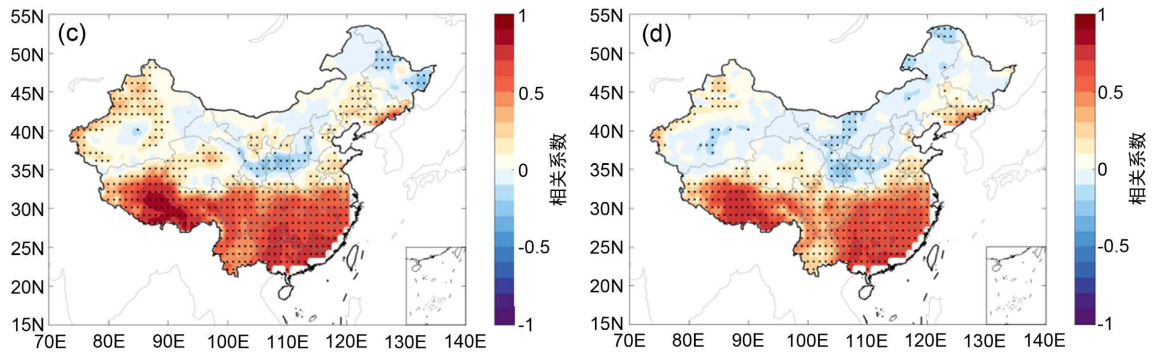
**图 6.** 1960~2010 年冬季土壤湿度线性趋势空间分布((a) 0~10 cm, (b) 10~40 cm, (c) 40~100 cm, (d) 100~200 cm; 黑点区域表示趋势通过 95% 显著性检验)

#### 4. 土壤湿度与降水的关系

图 7 可见，在 0~10 cm 深度范围内，土壤湿度与降水相关性最高，全国除了北疆一小部分地区，其余地区土壤湿度基本与降水有较高的正相关；然而随着土壤深度的不断增大，由于蒸发量等因素，土壤湿度与降水的关联程度也在不断的下降，这主要表现在 35°N 以北地区，从 10 cm 深度往下，北方地区土壤湿度与降水关系逐渐减弱。尤其 40 cm 深度以下，仅剩辽宁南部、新疆西北小部分地区土壤湿度与降水之间存在一定的正相关之外，北方其他地区土壤湿度与降水之间存在较弱的关系，甚至转变为负相关。





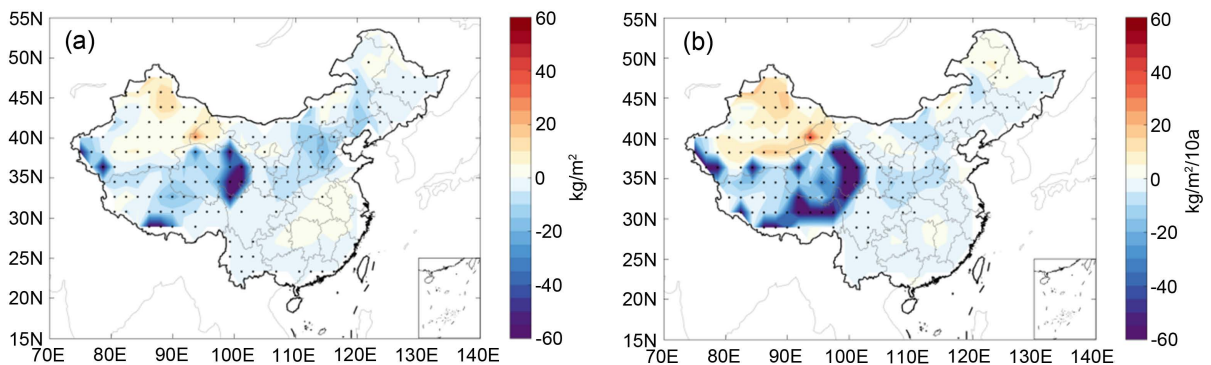


**Figure 7.** The spatial distribution of correlation between soil moisture and precipitation during 1960~2010 ((a) 0~10 cm, (b) 10~40 cm, (c) 40~100 cm, (d) 100~200 cm; the black dot indicates the trend passes the 95% significance test)

**图 7.** 1960~2010 年土壤湿度与降水之间的相关系数空间分布图((a) 0~10 cm, (b) 10~40 cm, (c) 40~100 cm, (d) 100~200 cm; 黑点区域表示趋势通过 95% 显著性检验)

### 5. 中国北方地区土壤湿度的未来变化

图 8 给出了 RCP4.5 和 RCP8.5 两种排放情景下土壤湿度的空间线性趋势。可以看出，在 RCP4.5 排放情景下 35°N 以北中国西部，尤其在新疆北部及东部、甘肃西部地区，2020~2100 年土壤湿度将呈现出增加的趋势，而在青海北部、东部地区，土壤湿度则处于一个较为明显的下降趋势；华北、内蒙古、东北地区土壤湿度变化趋势为较微弱的下降趋势。在 RCP8.5 排放情景下，土壤湿度的空间变化与 RCP4.5 情景下的类似，不同是，新疆等地的增加趋势增强，青海等地土壤湿度减少的趋势也在增加，而内蒙古、东北等地区的变化趋势有从减少变为增加的趋势。从区域平均来看，相对于 1986~2005 年，RCP4.5, RCP8.5 两种排放情景下，2020~2100 年土壤湿度将呈现出减少的趋势(图略)。



**Figure 8.** The spatial distribution of linear trend of soil moisture during 2020~2100 under RCP4.5 (a) and RCP8.5 (b) (The black dot indicates the trend passes the 95% significance test)

**图 8.** RCP4.5 (a) 和 RCP8.5 (b) 两种排放情景下 2020~2100 年土壤湿度的线性趋势空间分布(其中黑点表示线性趋势通过 95% 显著性检验)

### 6. 结论

本文利用 GLDAS 土壤湿度数据和 GPCC 降水数据，分析了我国北方土壤湿度的变化特征，并讨论了土壤湿度与降水之间的关系。进一步基于 CMIP5 模式在 RCP4.5, RCP8.5 两种排放情景下的数据预估了北方干旱区土壤湿度未来的变化。得出如下结论：

- 1) 我国土壤湿度的分布情形大致可以总结为“东湿西干”、“南湿北干”的特征。随着土壤深度的加深，土壤湿度逐渐增大。

2) 空间趋势表明近 50 年我国北方干旱半干旱区域土壤湿度在内蒙古东部、东北地区土壤湿度为下降趋势, 而新疆大部、甘肃西部以及青海北部地区土壤湿度为上升趋势。

3) 土壤湿度与降水的关系表明 0~10 cm 土壤湿度与降水的关系最强, 随着土壤深度的加深, 土壤湿度与降水之间的关系逐渐减弱, 甚至到 40 cm 以下, 土壤湿度与降水的关系由正相关转变为负相关。说明降水对浅层土壤湿度的影响最为明显。

4) 在 RCP4.5, RCP8.5 两种排放情景下, 新疆、甘肃西部土壤湿度呈现出增加的趋势, 且随着排放浓度的增加, 土壤湿度增大的速率在加快, 说明未来(2020~2100 年)新疆、甘肃西部等地区将会变得更加湿润。在内蒙古、东北地区土壤湿度呈现出减少的趋势, 随着排放浓度的增加, 土壤湿度减小的速率在降低, 甚至部分地区也转变为弱的增加趋势。

## 参考文献

- [1] 马柱国, 魏和林, 符淙斌. 中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系[J]. 气象学报, 2000, 58(3): 278-287.
- [2] 管晓丹, 程善俊, 郭瑞霞, 等. 干旱半干旱区土壤湿度数值模拟研究进展[J]. 干旱气象, 2014, 32(1): 135-141.
- [3] Wang, A.H., Lettenmaier, D.P. and Sheffield, J. (2011) Soil Moisture Drought in China, 1950-2006. *Journal of Climate*, **24**, 3257-3271. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3733.1>
- [4] 卢麾, 施建成. 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[J]. 科学通报, 2012, 57(16): 1412-1422.
- [5] 苏明峰, 王会军. 全球变暖背景下中国夏季表面气温与土壤湿度的年代际共变率[J]. 科学通报, 2007, 52(8): 965-971.
- [6] 符淙斌, 安芷生, 郭维栋. 我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究(I): 主要研究成果[J]. 地球科学进展, 2005, 20(11): 1157-1167.
- [7] 马柱国, 符淙斌. 中国干旱和半干旱带的 10 年际演变特征[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3): 519-525.
- [8] 符淙斌, 马柱国. 全球变化与区域干旱化[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 752-760.
- [9] 尹晗, 李耀辉. 我国西南干旱研究最新进展综述[J]. 干旱气象, 2013, 31(1): 182-193.
- [10] 琚建华, 吕俊梅, 谢国清, 等. MJO 和 AO 持续异常对云南干旱的影响研究[J]. 干旱气象, 2011, 29(4): 401-406.
- [11] 吴哲红, 詹沛刚, 陈贞宏, 等. 3 种干旱指数对贵州省安顺市历史罕见干旱的评估分析[J]. 干旱气象, 2012, 30(3): 315-322.
- [12] Walker, J.M. and Rowntree, P.R. (1977) The Effect of Soil Moisture on Circulation and Rainfall in a Tropical Model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **103**, 29-46. <https://doi.org/10.1002/qj.49710343503>
- [13] 管晓, 程善俊, 郭瑞霞, 等. 干旱半干旱区土壤湿度数值模拟研究进展[J]. 干旱气象, 2014, 32(1): 135-141.
- [14] Zhang, A.Z. and Jia, G.S. (2013) Monitoring Meteorological Drought in Semiarid Regions Using Multi-Sensor Microwave Remote Sensing Data. *Remote Sensing of Environment*, **134**, 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.023>
- [15] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.