

青藏高原多年冻土区土壤湿度的变化特征研究

周钰瑶, 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28日; 录用日期: 2021年11月24日; 发布日期: 2021年11月30日

摘要

本文利用GLDAS四层(0~10 cm, 10~40 cm, 40~100 cm, 100~200 cm)土壤湿度数据,对青藏高原多年冻土区土壤湿度的时空变化特征进行分析。结果表明: 1) 四层均从秋季开始土壤湿度逐渐降低,从春季开始,土壤湿度逐渐增大,且浅层0~10 cm土壤湿度年变化最为明显; 2) 青藏高原多年冻土区春秋土壤湿度均呈现出增加的趋势,但增加趋势不明显,浅层0~10 cm土壤湿度波动幅度最大; 3) 在空间分布上,春秋多年冻土区四层土壤湿度均呈现从西南向东北递减的分布特征,随着土壤深度的增加,土壤湿度逐渐增加; 4) 空间趋势表明多年冻土区0~40 cm春季土壤湿度均呈现增加的趋势,且在浅层(0~10 cm)增加最为明显,随着土壤深度的增加,土壤湿度开始减少,其中深层(100~200 cm)土壤湿度减少最快。秋季与春季呈现相似的空间分布,但秋季100~200 cm土壤湿度减少的速率更快,尤其在多年冻土南缘附近。

关键词

青藏高原, 多年冻土, 土壤湿度

Study on the Variation Characteristics of Soil Moisture in Permafrost Region of Qinghai-Tibet Plateau

Yuyao Zhou, Hongxia Shi

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

Received: Oct. 28th, 2021; accepted: Nov. 24th, 2021; published: Nov. 30th, 2021

Abstract

Based on the soil moisture datasets of GLDAS, including four depths (0~10 cm, 10~40 cm, 40~100 cm, 100~200 cm), the spatial and temporal characteristics of soil moisture in the permafrost region over the Tibetan Plateau (TP) are analyzed. The results show that: 1) Soil moisture in the four depths gradually increase from the autumn, and gradually decrease from the spring; the soil moisture in the shallow layer (0~10 cm) has the most obvious change; 2) Soil moisture in spring and autumn both has an increasing trend, although the trend is not obvious; soil moisture in the shallow layer (0~10 cm) has the maximum fluctuation; 3) Soil moisture in spring and autumn display a characteristic that decreasing from southwest to northeast, and it gradually increases, as the depth of the soil increases; 4) In the depth of 0~40 cm, soil moisture in spring indicates an increasing trend and the most obvious changes occur in the shallow layer (0~10 cm), as the depth of soil increases, soil moisture has a declined trend, especially in the deep layer (100~200 cm), it has a most significant decrease. In autumn, soil moisture has the same distribution, while soil moisture declines faster than that in spring, especially in the southern edge of permafrost.

Keywords

Tibetan Plateau, Permafrost, Soil Moisture

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

青藏高原(下称高原)是世界海拔最高的高原, 平均海拔 4000 m 以上。由于其特殊的地理环境和气候条件, 该地区广泛发育着多年冻土和季节性冻土, 多年冻土是青藏高原高寒生态系统重要的组成部分[1]。多年冻土作为不透水层, 阻止了土壤水分的下渗, 稳定土壤含水量[2]。多年冻土对于土壤水分有着重要的调节作用, 气候变暖导致的多年冻土的退化, 会降低土壤水分的调节能力, 进而影响到高原生态系统和水文循环[3]。近年来, 在全球变暖的背景下, 高原也经历了显著的增温, 这使得高原多年冻土已呈现出显著地响应[4]。多年冻土的变化会对土壤水分产生一定的影响。因此, 多年冻土区土壤水分的变化是寒区植被生态系统研究的关键问题之一[5]。

土壤湿度作为陆面过程的一个重要参数, 土壤湿度的变化会影响到地表反照率、热容量等土壤物理属性, 以及地表蒸发、地表能量收支和生态过程等[6]。目前, 广大学者对高原土壤湿度也展开了较多相关研究。石磊等[7]基于美国气候预测中心(CPC)土壤湿度资料, 分析了高原土壤湿度的时空演变特征, 结果表明高原土壤湿度呈自东南向西北递减的分布特征, 土壤湿度与降水量在空间上有较好的对应关系, 在时间上存在 2~4 个月的时滞相关。卓嘎等[8]基于多源土壤温湿度融合分析产品研究了 2009~2010 年高原土壤湿度的时空分布特征, 认为高原土壤湿度具有显著的季节变化, 空间上呈现出浅层和深层低湿, 中间层高湿的特点。近年来, 高原多年冻土区的水热状况已发生了改变, 水热状况的改变会影响到冻融循环[9], 而与冻融过程相关的春季土壤湿度异常会导致北半球的大尺度环流异常, 从而导致水汽输送和低空湿度发生变化, 进而使得夏季降水异常[10]。因此研究多年冻土区土壤湿度的变化有着重要意义。

而以往对高原土壤湿度时空特征方面的研究, 主要是在整个高原地区, 或者高原多年冻土区和季节冻土区选一定的代表站进行分析, 而在整个多年冻土区对土壤湿度的特征进行分析的论文较少。另外, 受到选用资料时间和空间连续性的影响, 高原土壤湿度的研究存在一定的局限性。

邓明珊等[11]评估了全球陆面数据同化系统(global land data assimilation system, 简称“GLDAS”)四套陆面数据同化产品在高原的适用性, 发现 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 陆面模式提供的长时间的土壤湿度资料, 对高原多年冻土区土壤湿度的时空变化规律进行分析, 这对研究寒区多年冻土水热机制方面有一定参考意义。

2. 资料与方法

2.1. 资料

本文选取由美国国家航空航天局(NASA)提供的 GLDAS 中的 NOAH 土壤水分产品, 分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 时间段为 1960~2010 年。土壤水分数据包括四层: 0~10 cm, 10~40 cm, 40~100 cm, 100~200 cm。

另外, 本文还选用了英国 East Anglia 大学 climate research unit (简称 CRU)提供的气温数据, 资料序列长度为 1901~2012 年。陈发虎等[12]研究表明 CRU 资料具有较高的可靠性和适用性。因此, 本文基于 CRU 气温数据, 按照多年冻土的定义来确定多年冻土的范围。

2.2. 方法

线性回归[13], 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 为气候倾向率, 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 绝对值的大小反映了土壤湿度增加或减少的强度。

3. 青藏高原多年冻土范围的定义

一般将年平均 0°C (2 m 气温)的等值线位置定义为多年冻土的界限。图 1 给出了青藏高原多年冻土的范围。可以看出, 1981~1990 年, 1991~2000 年、2001~2010 年每十年平均的多年冻土范围, 随着时间的推移, 多年冻土的南缘在北移, 但是整个多年冻土范围的分布变化不是很明显。因此, 本文后面提到的多年冻土的范围都是基于 1981~2010 年 30 年年平均的 0°C 线所确定的。

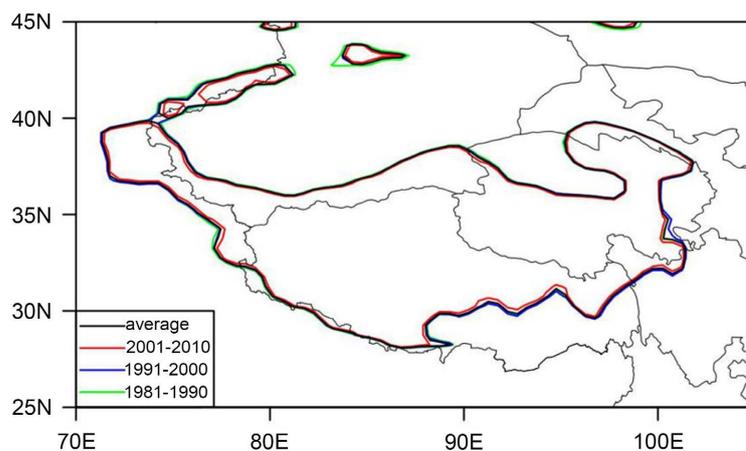


Figure 1. Spatial distribution of permafrost area over the Tibetan Plateau
图 1. 青藏高原多年冻土区的空间分布

4. 青藏高原多年冻土区土壤湿度的时空特征

4.1. 青藏高原多年冻土区土壤湿度的时间变化特征

图2是高原多年冻土区土壤湿度的月变化, 0~10 cm 土壤湿度范围在 15.0~22.0 kg/m², 10~40 cm 土壤湿度范围在 66.5~72.5 kg/m², 40~100 cm 土壤湿度范围在 130.0~142.0 kg/m², 100~200 cm 在土壤湿度范围在 234.0~254.0 kg/m²。土壤表层(0~10 cm)的月变化最大, 这可能与土壤表层易受到太阳辐射影响有关。相比之下, 其他三层的土壤湿度变化较小。总的来看, 不同深度处土壤湿度值大小存在较大差异, 但是其随时间变化的规律基本一致, 而且随着土壤深度的不断加深, 受到环境因子的影响越来越小, 使得土壤湿度变化幅度也越来越小。从四层土壤湿度的分布上来看, 7、8月由于降水增加使得各层土壤湿度都出现峰值, 11月开始由于气温开始下降土壤冻结, 土壤湿度开始逐渐降低。

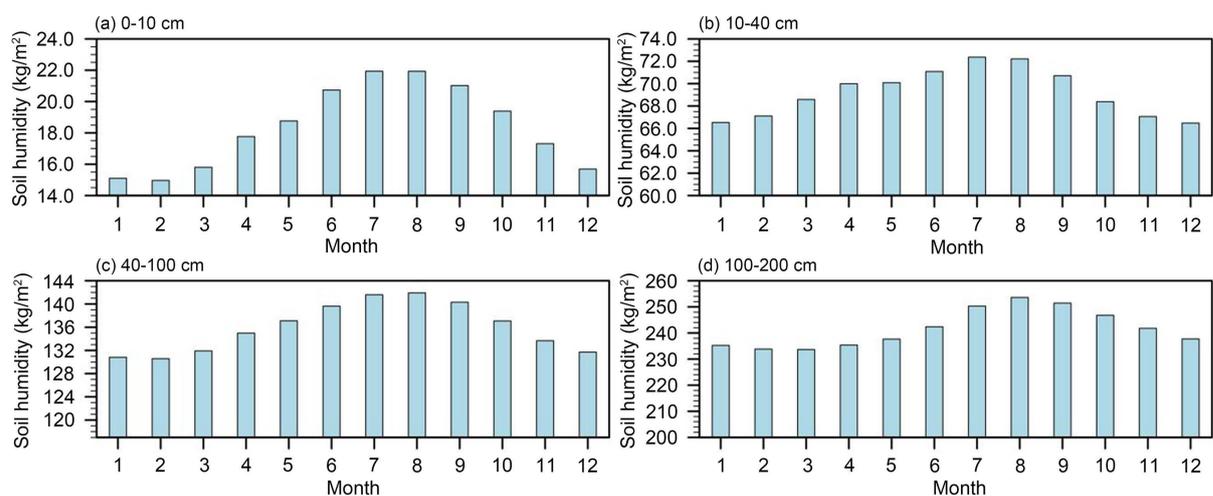


Figure 2. Monthly variation of soil moisture at different depths over the Tibetan Plateau during 1961~2009

图 2. 1961~2009 年青藏高原不同深度土壤湿度的月变化

从图2可以看出, 土壤湿度在春秋季节变化较大, 即在土壤开始冻结和融化的季节。图3进一步给出了青藏高原年平均、春秋土壤湿度的年际变化。可以看出, 1960~2009年0~10 cm 土层土壤湿度范围在 17.0~19.5 kg/m², 总体呈波动略微上升趋势, 在80年代以前, 土壤湿度缓慢上升至 19.0 kg/m², 至1979年下降至 17.1 kg/m²后, 基本呈波动上升趋势; 0~10 cm 土层春季土壤湿度范围在 15.5~18.1 kg/m², 秋季土壤湿度波动范围在 17.5~20.5 kg/m², 秋季的土壤湿度普遍大于春季的土壤湿度, 春季跟秋季波动幅度都比较大, 整体呈波动上升趋势。

10~40 cm 层次的土壤湿度, 从年均变化趋势来看, 年平均土壤湿度范围在 67.5~71.5 kg/m², 呈波动上升趋势, 且上升幅度大于 0~10 cm 的; 春季土壤湿度范围在 66.0~73.0 kg/m², 秋季土壤湿度范围在 66.0~71.0 kg/m², 春秋的变化幅度比较相似, 春季的土壤湿度略大于秋季, 整体是波动上升趋势。

40~100 cm 层次的土壤湿度, 年平均土壤湿度范围在 130.0~140.0 kg/m², 年均变化呈波动上升趋势; 春季土壤湿度范围在 128.0~139.0 kg/m², 秋季土壤湿度范围在 131.0~143.0 kg/m², 春秋变化幅度相似, 秋季的土壤湿度略大于春季, 整体趋势为波动上升。

100~200 cm 层次的土壤湿度, 年均变化呈波动上升趋势, 年平均土壤湿度范围在 236.0~256.0 kg/m²; 秋季的土壤湿度略大于春季, 春季土壤湿度范围在 226.5~246.0 kg/m², 秋季土壤湿度范围在 237.0~254.5 kg/m², 春秋变化幅度相似, 整体趋势平稳上升。

对比四个层次的土壤湿度年际变化, 四个层次的土壤湿度虽然数值上有差异, 但是在不同时期的变化趋势是一致的。在 20 世纪的 80 年代前缓慢上升, 80 年代后略有所下降, 但 1960~2009 年土壤湿度都呈现上升趋势, 且深层增加比浅层明显。

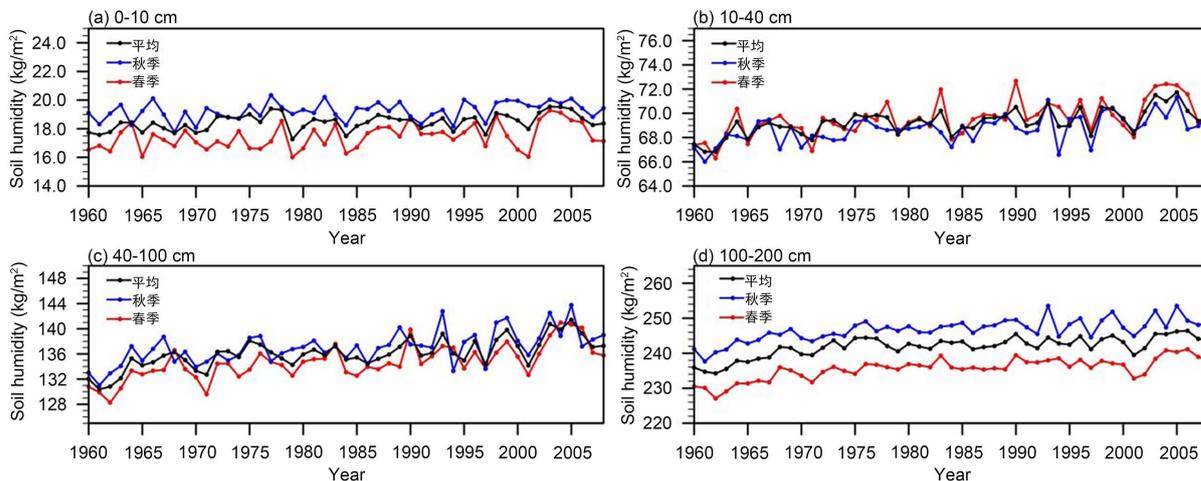


Figure 3. Annual variation of soil moisture at different depths in the permafrost region in the Tibetan Plateau during 1961~2009
图 3. 1961~2009 年青藏高原多年冻土区不同深度土壤湿度的年际变化

4.2. 青藏高原多年冻土区土壤湿度的空间变化特征

图 4 为 1960~2009 年多年平均的春季土壤湿度的空间分布。可以看出, 0~10 cm 土壤湿度范围在 20~60 kg/m², 土壤湿度的数值从区域中间向四周逐渐下降; 10~40 cm 土壤湿度范围在 60~100 kg/m², 高值区在多年冻土区的西南区域; 10~100 cm 土壤湿度范围在 80~150 kg/m², 高值区占了多年冻土区的大部分区域; 100~200 cm 土壤湿度范围在 150~360 kg/m² 湿, 高值区位于多年冻土区的中部, 整体上土壤湿度从西南向东北递减。

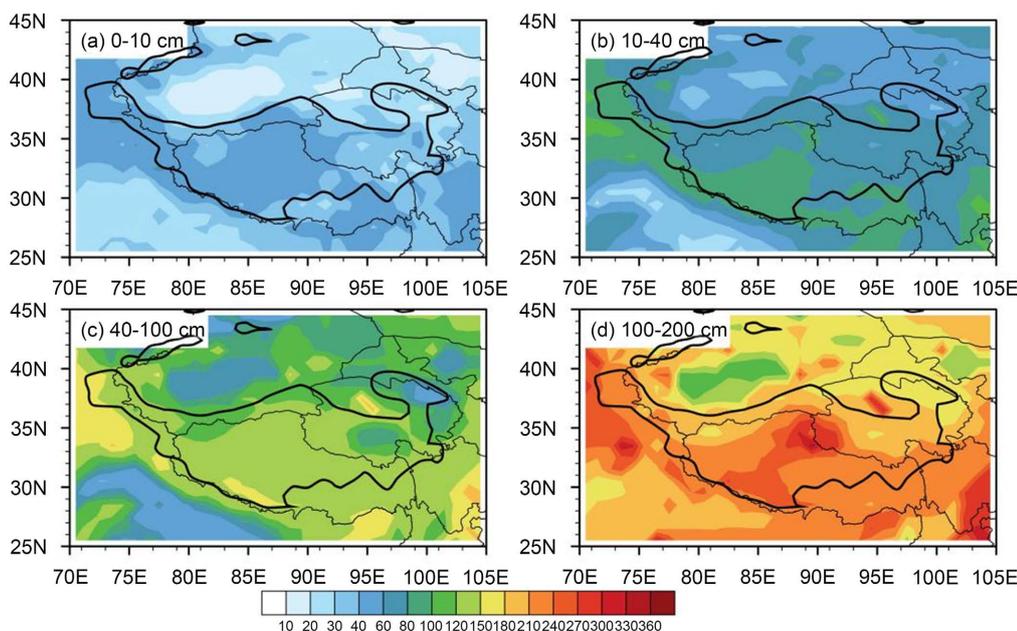


Figure 4. The spatial distribution of annual mean soil moisture over the Tibetan Plateau in spring during 1961~2009
图 4. 1961~2009 年多年平均的青藏高原春季土壤湿度的空间分布

可以看出, 随着土壤深度的增加, 春季多年冻土区的土壤湿度随之增大。这是因为土壤深度越深, 受到的太阳辐射越小, 土壤的水分蒸发越少。同时因为深层土壤中有含水层[14], 随着深度的加深, 土壤含水率的冻结期(融化期)也会增加(减少), 在冻结期, 土壤湿度会自上而下逐渐降低, 而在融化期则会自上而下逐渐增加[15]。

与春季多年冻土区土壤湿度的空间分布相比, 图 5 表明秋季土壤湿度也呈现相似的空间分布, 从多年冻土区的西南向东北逐渐降低, 而且随着土壤深度的增加, 土壤湿度也逐渐增加。

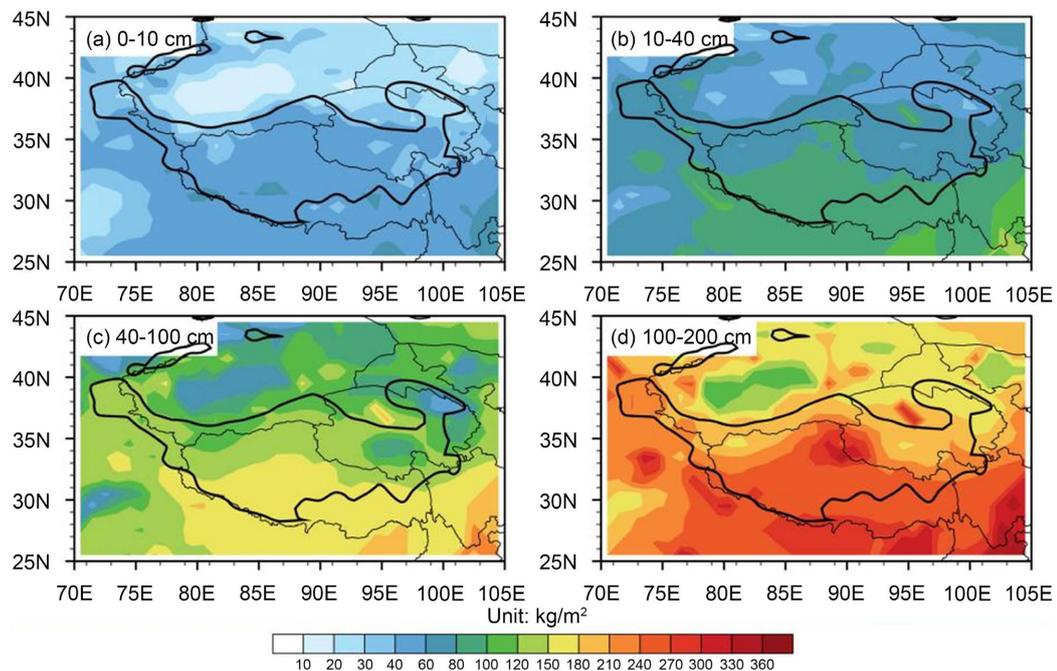
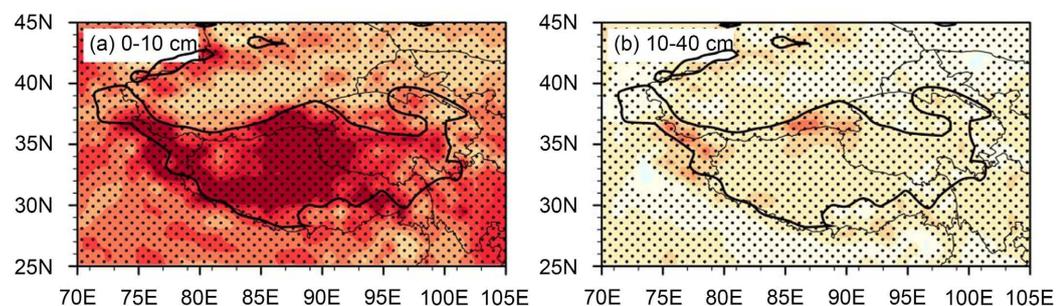


Figure 5. The spatial distribution of annual mean soil moisture over the Tibetan Plateau in autumn during 1961~2009
图 5. 1961~2009 年多年平均的青藏高原秋季土壤湿度的空间分布

图 6 表明 1961~2009 年春季青藏高原多年冻土区 0~10 cm 土壤湿度呈现出增加的趋势, 最大增幅为 $3.375 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{year}^{-1}$, 最小增幅为 $0.75 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{year}^{-1}$ 。其中多年冻土区西南地区土壤湿度增长最为明显, 且增长速率从西南向东北逐渐减小。10~40 cm 土壤湿度也呈现出增长趋势, 增长速率介于 $0.375 \sim 0.75 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{year}^{-1}$, 可见 0~40 cm 随着土壤深度的增加, 土壤湿度增加的速率在降低。40 cm 以下土壤湿度开始呈现出降低的趋势, 尤其在 100~200 cm 深度处, 土壤湿度减少的速率与 0~10 cm 土壤湿度增加的速率相当。总的来看, 多年冻土区 0~40 cm 内土壤湿度是增加的, 且以浅层增加为主, 40~200 cm 内土壤湿度的是减少的, 且在最深层土壤湿度减少最明显。



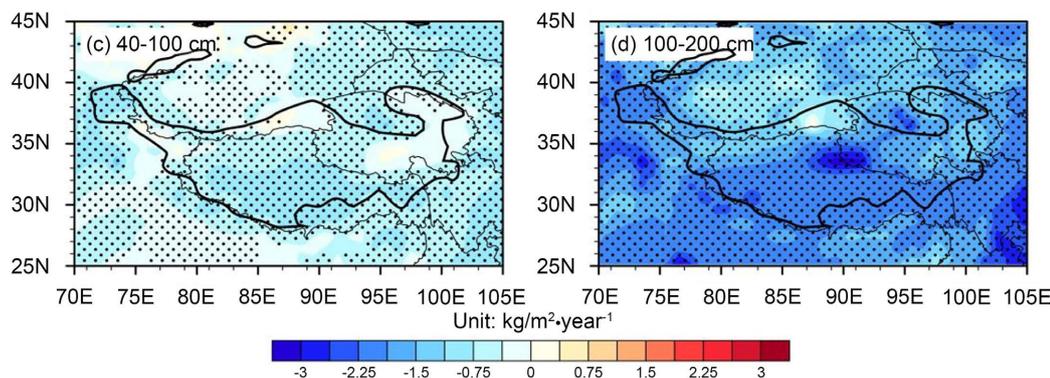


Figure 6. The spatial distribution of linear trend of soil moisture over the Tibetan Plateau in spring during 1961~2009
图 6. 1961~2009 年青藏高原春季土壤湿度的空间线性趋势分布

与春季相比, 图 7 秋季多年冻土区土壤湿度在 0~100 cm 变化的空间分布与变化速率均与春季的一致, 100~200 cm 土壤湿度在多年冻土的南缘减少的趋势比春季更明显。

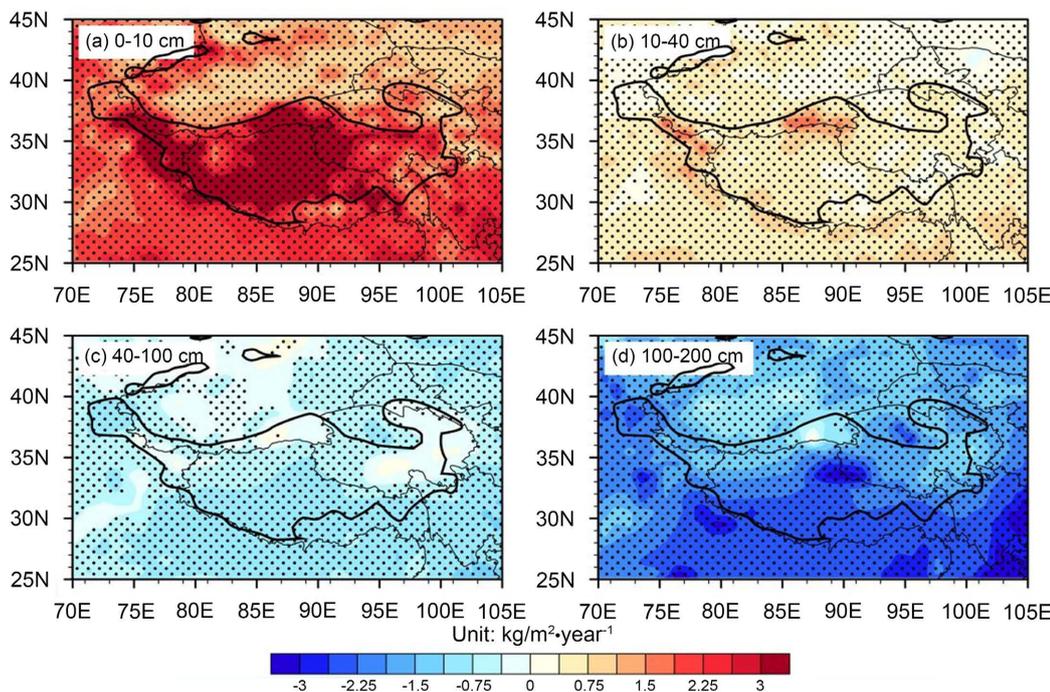


Figure 7. The spatial distribution of linear trend of soil moisture over the Tibetan Plateau in autumn during 1961~2009
图 7. 1961~2009 年青藏高原秋季土壤湿度的空间线性趋势分布

5. 结论

本文利用 GLDAS 四层土壤湿度数据, 对青藏高原多年冻土区土壤湿度的时空变化特征进行分析。得出以下主要结论:

- 1) 0~10 cm, 10~40 cm, 40~100 cm, 100~200 cm 四层均从秋季开始土壤湿度逐渐降低, 从春季开始, 土壤湿度逐渐增大, 且浅层 0~10 cm 土壤湿度变化最为明显。垂直方向来看, 随着土壤深度的增加, 土壤湿度增大。而且春秋两季是土壤湿度的变化较为明显的季节。
- 2) 土壤湿度的年际变化表明春秋两季四层土壤湿度均呈现出增加的趋势, 但增加趋势不明显。浅层

0~10 cm 土壤湿度波动幅度最大, 这主要是由于浅层土壤受到外界气候影响更明显。

3) 从春秋季节土壤湿度的空间分布可以看出, 在多年冻土区, 四层土壤湿度均呈现从西南向东北递减的分布特征, 高值区位于青藏高原南部。随着土壤深度的增加, 土壤湿度逐渐增加。

4) 从空间趋势分布可以看出, 0~40 cm 春季土壤湿度呈现增加的趋势, 且在浅层(0~10 cm)增加最为明显。从 40~200 cm, 土壤湿度开始呈现减少的趋势, 其中深层(100~200 cm)减少最快。可能是由于随着气候的变暖, 活动层深度加深, 多年冻土逐渐变薄, 含水量降低。秋季与春季呈现相似的空间分布, 但秋季 100~200 cm 土壤湿度减少的速率更快, 尤其在多年冻土南缘附近。

参考文献

- [1] Wu, X., Fang, H., Zhao, Y., Smoak, J. M., Li, W., Shi, W., *et al.* (2017) A Conceptual Model of the Controlling Factors of the Soil Organic Carbon and Nitrogen Densities in a Permafrost Affected Region on the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, **122**, 1705-1717.
<https://doi.org/10.1002/2016JG003641>
- [2] 郭正刚, 牛富俊, 湛虎, 等. 青藏高原北部多年冻土退化过程中生态系统的变化特征[J]. 生态学报, 2007, 27(8): 3294-3301.
- [3] 吴小丽, 刘桂民, 李新星, 等. 青藏高原多年冻土和季节性冻土区土壤水分变化及其与降水的关系[J]. 水文, 2021, 41(1): 73-78, 101.
- [4] Jin, H., Luo, D., Wang, S., *et al.* (2011) Spatiotemporal Variability of Permafrost Degradation on the Qinghai-Tibet Plateau. *Sciences in Cold and Arid Regions*, **3**, 281-305.
- [5] 陈珊珊, 臧淑英, 孙丽. 多年冻土区土壤湿度的动态变化及影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 113-118.
- [6] 张熙胤, 张明义, 路建国, 等. 土体冻融特征研究现状与展望[J]. 冰川冻土, 2017, 38(6): 1644-1657.
- [7] 石磊, 杜军, 周刊社, 等. 1980-2012 年青藏高原土壤湿度时空演变特征[J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1241-1248.
- [8] 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.
- [9] Hu, G.J., Zhao, L., Li, R., Wu, X., Wu, T., Zhu, X., *et al.* (2019) Simulation of Land Surface Heat Fluxes in Permafrost Regions on the Qinghai-Tibetan Plateau using CMIP5 Models. *Atmospheric Research*, **220**, 155-168.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.01.006>
- [10] Yang, K., Wang, C.H. and Bao, H.Y. (2016) Contribution of Soil Moisture Variability to Summer Precipitation in the Northern Hemisphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **121**, 12108-12124.
<https://doi.org/10.1002/2016JD025644>
- [11] 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.
- [12] 陈发虎, 黄伟, 靳立亚, 等. 全球变暖背景下中亚干旱区降水变化特征及空间差异[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(11): 1647-1657. <https://doi.org/10.1360/zd-2011-41-11-1647>
- [13] 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.
- [14] 杨健, 马耀明. 青藏高原典型下垫面的土壤温湿特征[J]. 冰川冻土, 2012, 34(4): 813-820.
- [15] 张娟, 沙占江, 徐维新. 青藏高原玉树地区巴塘高寒草甸土壤温湿特征分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 635-642.