

2002—2020 年黄土高原土壤水变化及其相关性分析

薛少博¹, 李鹏^{1,2}, 于坤霞¹, 苏远逸¹, 陈婧林¹, 汪令鹏¹

(1.西安理工大学省部共建西北旱区生态水利工程国家重点实验室,西安 710048;

2.西安理工大学旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室,西安 710048;)

摘要: 土壤水作为植物耗水最主要的来源,其变化对整个生态系统都有重要影响。利用 GRACE 卫星数据与 GLDAS-NOAH 模型,分析 2002—2020 年黄土高原土壤水时空变化规律,并结合 GEE 平台 2002—2020 年的 MODIS NDVI 产品数据集、与 2000—2017 年降水资料对土壤水的变化进行相关性分析,使用 M—K 检验法对趋势进行检验,结果表明:(1)2002—2020 年 GRACE 等效水高(毫米水柱高)变化月均值为 (-7.56 ± 4.38) mm,从 2008 年开始呈现显著减少趋势。(2)2000—2020 年 0—10 cm 土层土壤水呈不显著增加趋势,10—40, 40—100, 100—200 cm 呈不显著变化趋势,2012—2020 年 200 cm 以下土层土壤水呈显著减少趋势。(3)随着土层深度的增加,黄土高原 2000—2017 年的降水与土壤水的相关性在显著降低。相关性系数从 0—10 cm 时的 0.581 降低到 100—200 cm 时的 0.099。而将 2002—2020 年的 200 cm 以下土层土壤水与 NDVI 变化分析其相关性系数为 -0.805^* ,为显著负相关关系。研究结果阐述了黄土高原土壤水的变化规律,揭示了降水和 NDVI 变化与土壤水的相关性联系,为下一步黄土高原的植被恢复提供了理论支撑。

关键词: GRACE; NDVI; 黄土高原; GEE

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)05-0221-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2021.05.030

Soil Water Change and Its Correlation Analysis in the Loess Plateau from 2002 to 2020

XUE Shaobo¹, LI Peng^{1,2}, YU Kunxia¹, SU Yuanyu¹, CHEN Jinglin¹, WANG Lingpeng¹

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an

University of Technology, Xi'an 710048; 2.Key Laboratory of Ecological Hydrology and Disaster

Prevention in Arid Regions, National Forestry Administration, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: Soil water is the main source of plant water consumption, and its change has an important effect on the whole ecosystem. Using GRACE satellite data and GLDAS-NoAH model, this study analyzed the spatial and temporal variation of soil water in the Loess Plateau from 2002 to 2020. Combined with the from 2002 to 2020 MODIS NDVI product data set of GEE platform and the precipitation data from 2000 to 2017, the correlation analysis of soil water changes was carried out for comparative analysis, and the M—K test method was used to test the change trend. The results showed that: (1) The monthly mean of equivalent water height (mm water column height) of GRACE from 2002 to 2020 was (-7.56 ± 4.38) mm, and showing a significant decreasing trend from 2008. (2) From 2000 to 2020, soil water in the 0—10 cm soil layer showed no significant increase trend, while it showed no significant change trend in the 10—40, 40—100 and 100—200 cm soil layers, and it showed a significant decrease trend in the 200 cm soil layer from 2012 to 2020. (3) With the increasing of soil depth, the correlation between precipitation and soil water decreased significantly in the Loess Plateau from 2000 to 2017. Correlation coefficient decreased from 0.581 of 0—10 cm soil layer to 0.099 of 100—200 cm soil layer. The correlation coefficient between NDVI and soil water of the soil layer deeper than 200 cm 2002 to 2020 was -0.805 , which was a significant negative correlation. The results revealed the change law of soil water in the Loess Plateau, revealed the correlation between precipitation and NDVI changes and soil water, which could provide a theoretical support for the next step of vegetation restoration in the Loess Plateau.

收稿日期: 2021-05-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(52079104)

第一作者: 薛少博(1996—),男,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail: 1127015651@qq.com

通信作者: 李鹏(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事水土保持、土壤侵蚀研究。E-mail: lipeng74@163.com

Keywords: GRACE; NDVI; the Loess Plateau; GEE

在黄土高原,土壤水分是植被生长所需水分的直接来源^[1]。自 1999 年起,我国便在黄土高原实施了针对>25°陡坡耕地的退耕还林(草)工作,作为最早实施退耕还林(草)工程的区域之一,对中国森林覆盖度的提升作出了较大贡献^[2-3]。从 1999—2010 年,黄土高原造林面积累计达到 1 890.6 万 hm²,植被覆盖度从 31.6%(1999 年)增加至 59.6%(2013 年)^[4-5]。而相比农田、草地,林地具有更深的根系,可以吸收深达 20 m 的深层土壤水分^[6-7]。大量种植的人工林也对黄土高原的水分循环造成了影响^[8-10]。

诸多学者使用不同方法对黄土高原退耕还林后的生态水文变化进行了分析研究,尤南山等^[11]使用 2000—2016 年总初级生产力(GPP)数据与 2000 年和 2015 年 2 期的土地利用数据,对退耕还林后的植被变化进行分析,结果显示,GPP 显著上升区域占全区面积的 67.3%,平均增速 24.1 g/(m²·a);胡鹏飞等^[12]利用 GRACE 数据研究了 2003—2015 年黄土高原陆地水储量变化的时空分布特征,分析了气候变化与人类活动对黄土高原陆地水储量的变化,结果显示,2003—2015 年黄土高原土壤水资源储量总体呈现减少趋势,季节性变化为秋季>冬季>夏季>春季;穆兴民等^[13]通过实地采样发现,黄土高原人工林大量耗水形成了 3—8 m 土层存在特殊的土壤干层现象;Lü 等^[14]通过水量平衡计算蒸散发表明,黄土高原蒸散发增加和退耕还林还草实施以来植被恢复有很大关系;刘欢欢等^[15]对比了全球陆面数据同化系统(GLDAS—NOAH)陆面模式的土壤湿度数据和国家气象信息中心提供的站点土壤湿度观测资料发现,GLDAS 数据可作为黄土高原土壤湿度观测的替代资料^[14]。

本研究利用 GRACE 数据与 GLDAS—NOAH 模型,得到 2002—2020 年的黄土高原土壤水时空变化规律,并结合 GEE 平台的 MODIS NDVI 产品数据集与降水资料进行相关性分析,以期阐述黄土高原土壤水储量的变化趋势与其主要影响因素。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄土高原位于中国中部偏北部地处(33°43′—41°16′N,100°54′—114°33′E),为中国四大高原之一,面积达到 64 万 km²,主要由山西高原、陕甘晋高原、陇中高原、鄂尔多斯高原和河套平原组成,海拔高度 800~3 000 m(图 1)。除少数石质山地外,黄土厚度 50~80 m,最厚达 150~180 m。黄土高原年降水量在 150~750 mm,且由东南向西北递减。黄土高原

东南部的山西,河南是整个区域降水量最充沛的地区,年降水量在 600 mm 以上;而西北部地区的年降水量仅在 200 mm 左右。受季风影响,黄土高原降水量在季度和年际之间具有较大的变化率。黄土高原降水量季度变化率平均在 50%~90%。降水年际和季节分布不均,变化率大。蒸发量普遍高于实际降水量,年水面蒸发量变动为 1 400~2 000 mm,总趋势为南低北高,东低西高。黄土高原地区干燥度为 1.42~15.88,干燥化趋势由东南向西北方向递增^[16]。

黄土高原是中国乃至世界上水土流失最严重的区域之一,土壤侵蚀面积达 39 万 km²,其 60%以上的地区存在着不同程度的水土流失现象,剧烈水蚀地区面积高达 3.7 万 km²,占全国同类侵蚀面积的 89%^[3]。

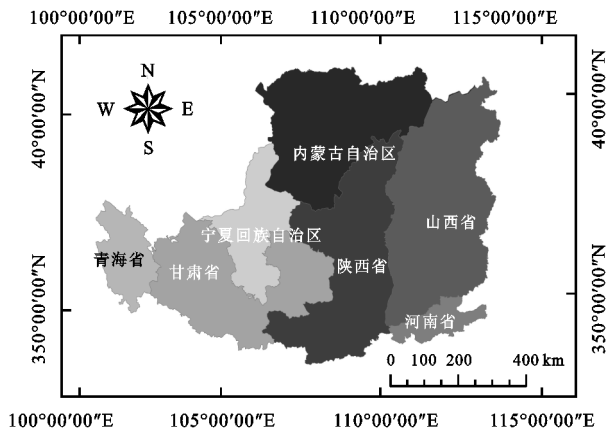


图 1 黄土高原空间位置

1.2 数据来源与分析方法

1.2.1 数据来源 GRACE 数据:2002—2020 年的来源于美国空间研究中心(CSR)2021 年 3 月 26 日更新的 GRACE/GRACE—FO RL06 Mascon 数据(http://www2.csr.utexas.edu/grace/RL05_mascons.html),Mascons 方法主要通过 GRACE 卫星的高精度星间观测数据,直接计算某一区域质量变化对应的等效水高^[17]。吴奇凡^[18]通过对比 CSR—M、JPL—M 与 CSFC—M 认为,CSR—M 较为准确且 CSR—M 仅用 GRACE 数据作约束条件,没有引入其他水文模型误差。该数据集空间分辨率为 0.25°×0.25°。

2000—2020 年的浅层土壤含水量数据来自全球陆地数据同化系统(GLDAS)的 National Centers for Environmental Prediction/Oregon State University/Air Force/Hydrologic Research Lab model(NOAH)模型(<https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?keywords=Hydrology&page=1>),空间分辨率为 0.25°×0.25°,该模型可以模拟 4 层,分别为 0—10,10—40,40—100,100—200 cm 土层土壤含水量。根据 Li 等^[19]的研究,黄土高原的农田与草地的根系绝大多数在此范围

之内。因此该数据可以较好模拟 2000—2020 年黄土高原农田与草地耗水量的变化情况。

2000—2017 年的降雨数据来源于第 2 次青藏高原综合科学考察研究发布的 1901—2017 年中国 1 km 月气候数据(<http://loess.geodata.cn/>)。该数据集是我国目前时间序列最长、空间分辨率最高、覆盖面积最广的月气候数据集^[20]。

2002—2020 年 NDVI 数据来源于 GEE 平台的 MODIS/006/MOD13A2 数据 (<https://explorer.earthengine.google.com/#detail/MODIS%2F006%2FMOD13A2>),该数据空间分辨率为 1 km,时间间隔为 16 天,是从 16 天中选择最佳的可用像素值。使用的标准是低云、低视角和最高的 NDVI/EVI 值。共下载 414 期。使用最大值合成法在 Arcgis 10.6 中将该数据合成为年尺度数据^[21-22]。

1.2.2 分析方法 使用 SPSS 软件进行 Pearson 相关性分析,统计显著性水平值 $\alpha=0.01$ 。

使用 Matlab 软件编程使用非参数 Mann-Kendall 检验方法(M-K)进行长时间序列变化的趋势性检验,对于给定的显著性水平 α ,当 $|Z|>Z_{1-\alpha/2}$ 时,拒绝原假设,即在显著性水平 α 上,该时间序列具有显著性 α 的变化趋势;当 $1.96<|Z|\leq 2.58$ 时,表明序列在 5% 的显著性水平上具有显著的变化趋势;当 $|Z|>2.58$ 时表明序列在 1% 的显著性水平上具有显著的变化趋势。

2 结果与分析

2.1 黄土高原 0—200 cm 土层土壤水时间变化规律

根据 GLDAS—NOAH 模型生成黄土高原 0—200 cm 土层土壤水时间变化规律。由图 2 可知,黄土高原 0—200 cm 月均值土壤水变化趋势均是先从 2000 年的增加到 2004 年后逐渐降低,2005—2020 年月均值土壤水一直在波动变化,并在 2019 年达到最大值。

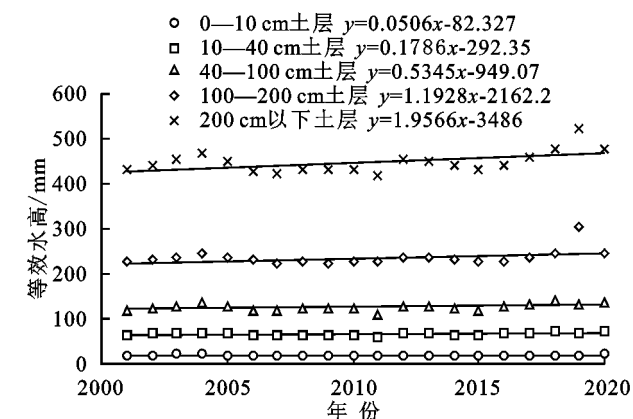


图 2 黄土高原 2000—2020 年土壤水变化规律

使用 M-K 检验法对土壤水的变化趋势进行检验,检验结果表明,2000—2020 年黄土高原 0—10 cm

土壤水呈现增加趋势,但是增加趋势不显著($p>0.01$)。土壤水月均值增加为 0.056 mm。10—40, 40—100, 100—200 cm 呈现不显著变化趋势($p>0.01$),月均值增加量分别为 0.18, 0.5, 1.1 mm。

2.2 黄土高原 0—200 cm 土层土壤水空间变化规律

将 GLDAS—NOAH 模型数据使用 GIS 软件进行空间变化规律分析(图 3),2000—2020 年黄土高原 0—10 cm 土层土壤水月均值除青海省以外区域呈现减少趋势,山西省东部减少量较多,青海省与甘肃省南部呈现增加趋势。10—40 cm 土层土壤水月均值整体盈亏变化较小,山西省东部土壤水减少较多,青海省南部增加较为明显。40—100 cm 土层土壤水月均值青海省增加较多,山西省东部减少较多,其余各地区土壤水多呈现轻微减少态势。100—200 cm 土层土壤水月均值山西省减少较多,其余各省略有减少。随着土层深度的增加,陕西北部、内蒙东北部的土壤水明显增多。

2.3 黄土高原水储量及 200 cm 以下土层土壤水分时空变化分析

根据 GRACE 卫星生成的黄土高原 2002—2020 年水储量变化分析(图 4),2002—2020 年黄土高原的水储量变化呈现东边减少西边增加的态势,其中山西省减少最多,内蒙古自治区减少较小。青海省、甘肃省和宁夏省出现增加的状态,陕西省呈现北部减少,南部增多的态势。

2002—2005 年 GRACE 等效水高变化月均值变化均为正值,说明黄土高原水储量持续增大;2006 年至 2020 年 GRACE 等效水高变化月均值变化均为负值,且绝对值越来越大,说明 2002 年—2020 年,黄土高原水储量呈现明显下降趋势,并且下降趋势越来越大。到 2020 年黄土高原每月等效水高都降低 10.9 cm。2002—2020 年 GRACE 等效水高变化月均值为 (-7.56 ± 4.38) mm,从 2008 年开始呈现显著减少趋势,通过了显著性水平 1% 的显著性检验。

将 GRACE 卫星的水储量数据与 GLDAS—NOAH 模型的浅层土壤水数据结合分析^[12]。2002—2020 年黄土高原所有省份 200 cm 以下土层的土壤水均出现了不同程度的减少,其中内蒙古自治区,宁夏回族自治区与甘肃省西北部的减少幅度较小,而山西东部减少幅度较大。使用 M-K 趋势性检验分析,得到结论,2000—2012 年,200 cm 以下土层土壤水呈现不显著减少趋势($p>0.01$),2012—2020 年呈现显著减少趋势($p<0.01$)。200 cm 以上土层与 200 cm 以下土层呈现了相反的变化趋势,可能与植被恢复等人类活动有关。

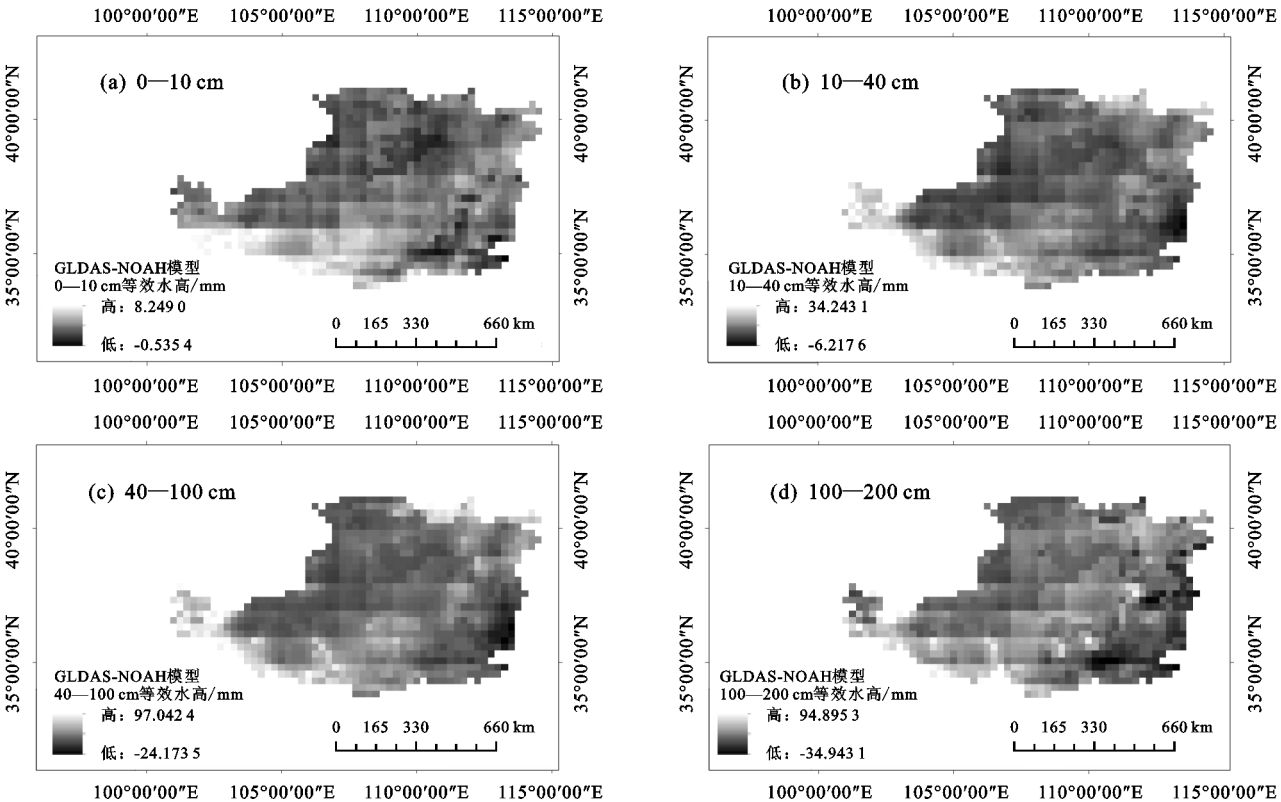


图 3 2000—2020 年黄土高原浅层土壤水变化

2.4 黄土高原 GLDAS—NOAH 模型联合降水与 NDVI 相关性分析

为了分析黄土高原土壤水的影响因素,表 1 列出了黄土高原 2000—2020 年降水、GRACE、NDVI 月均值数据,使用 SPSS 软件进行皮尔逊相关性分析。结果表明,随着土层深度的增加,黄土高原 2000—2017 年降水与土壤水的相关性在明显降低。相关性系数从 0—10 cm 时的 0.581 降低到 100—200 cm 时的 0.099。说明随着土层深度的增加,降水不再显著影响土壤水($p>0.01$)。利用 M—K 检验黄土高原 2000—2020 年归一化植被指数 (NDVI) 与 2000—2017 年降水得到结论,NDVI 呈显著增加趋势($p<0.01$),平均值从 2000 年的 0.52 增加到了 2020 年的 0.63。最大值出现在 2018 年的 0.64。黄土高原 2000—2011 年降水呈不显著增加趋势并在 2004 年达到最大值 349.8 mm,2011—2017 年呈显著增加趋势,平均降雨量增加为 2.4 mm。

其中 2000—2017 年的降雨与 NDVI 相关性系数为 0.22,说明降雨对 NDVI 平均值的增加有一定作用,但并不是最主要的作用。在 0—100 cm 土层中,随着土层深度的增加,土壤含水量与 NDVI 的相关性系数从 0—10 cm 的 0.53 提高至 40—100 cm 的 0.58。在 100—200 cm 土层中,土壤含水量与 NDVI 的相关性系数又降低到了 0.38,说明在 100—200 cm 范围内,植被的增加与土壤水的损耗相关性较低。而 2002—2020 年的 200 cm 以下土层土壤水与 NDVI 变化分析其相关性系数为 -0.805^* ,为显著负相关。说明,NDVI 的增加显著性的减少了 200 cm 以下土层的土壤水含量。

3 讨论

本研究利用 GRACE 卫星数据与 GLDAS—NOAH 模型,得到 2002—2020 年的黄土高原土壤水时空变化规律。并结合 GEE 平台的 MODIS NDVI 产品数据集与 2000—2017 年的降水资料进行相关性分析。

2002—2020 年黄土高原水储量从空间上分析是自西向东减少,整体上处于亏损状态。这一结论与胡鹏飞等^[12]在 2003—2015 年所做的黄土高原水储量的变化趋势一致。探究了降水对 0—200 cm 土层土壤含水量的影响,随着土层深度的增加,降水与土壤含水量的相关性系数也在降低,这一结论与穆兴民等^[13]研究黄土高原降雨补给土壤水主要在 200 cm 以上,200 cm 以下土层受到降水与蒸发随机影响较小的结论一致。使用 M—K 趋势性检验分析了黄土高原水储量的趋势性变化。200 cm 以下土层土壤水呈现减少趋势,且与 NDVI 变化呈现显著负相关关系,而 200 cm 以上土层土壤水则呈现增加趋势,且与 NDVI 变化无显著相关关系,说明 NDVI 的增加显著减少了 200 cm 以下土层的土壤水,该结论与张晨成等^[23]通过对黄土高原退耕还林人工林地土壤储水量的实测数据研究得到人工林地 3—4 m 土层土壤储水量损失量最大的结论一致。也与李陆生等^[6]、程立平等^[24]研究得出的人工林地储水量在 0—1 m 范围内与草地和农田相比并无明显减少的结论相吻合。植被恢复措施造成的 NDVI 的增加,加大了深层土壤水分的消耗,这与刘丙霞等^[25]的研究结论一致。

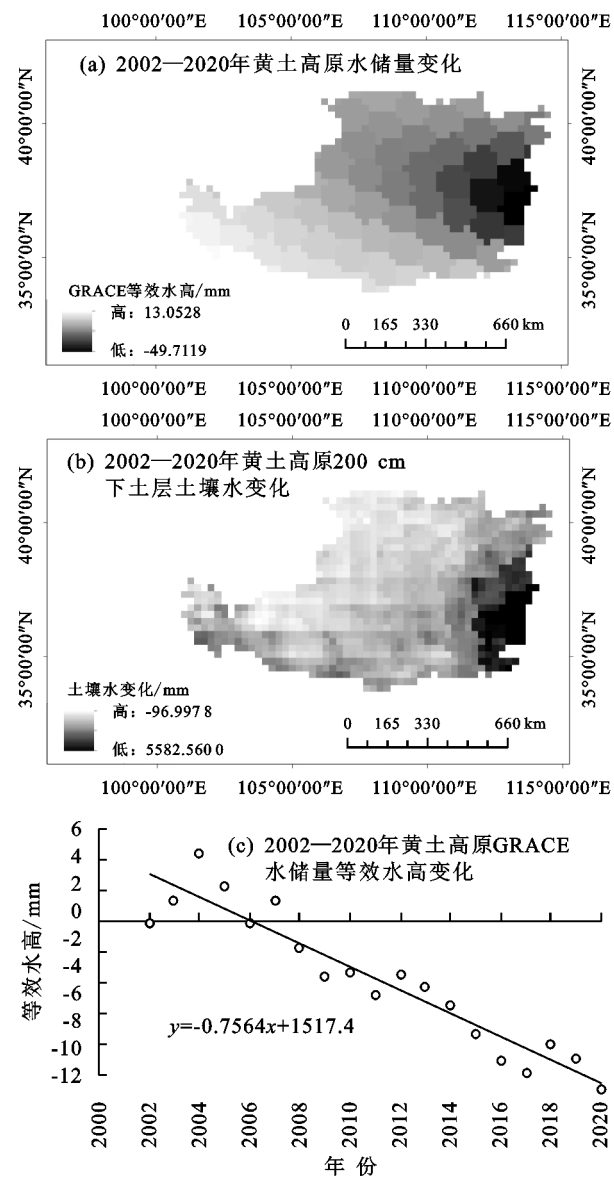


图4 2002—2020年黄土高原土壤水变化

表1 黄土高原 2000—2020 年降水、GRACE、NDVI 月均值数据

年份	降水量/mm	GRACE 等效水高/mm	NDVI
2000	318.59	/	/
2001	340.72	/	/
2002	362.49	-0.18	0.52
2003	482.52	1.39	0.52
2004	349.79	4.37	0.53
2005	322.15	2.32	0.53
2006	338.76	-0.10	0.54
2007	387.18	1.31	0.55
2008	357.47	-1.80	0.55
2009	359.12	-3.54	0.55
2011	403.16	-4.74	0.56
2012	394.69	-3.48	0.61
2013	396.83	-4.33	0.60
2014	399.52	-5.48	0.57
2015	343.49	-7.29	0.57
2016	401.07	-9.04	0.59
2017	401.90	-9.85	0.59
2018	/	-8.06	0.64
2019	/	-8.91	0.61
2020	/	-10.96	0.63

4 结论

2000—2020 年黄土高原 0—10, 10—40, 40—100, 100—200 cm 土壤水均呈现不显著增加趋势。土壤水年增加为 0.67, 2.16, 6.00, 13.20 mm。空间上山西省东部土壤水减少最多。

随着土层深度的增加,黄土高原 2000—2017 年的降水与土壤水的相关性系数从 0—10 cm 时的 0.581降低到 100—200 cm 时的 0.099,说明随着土层深度的增加,降水对土壤水的影响在降低。

2002—2020 年的 200 cm 以下土层土壤水与 NDVI 变化联袂发现其相关性系数为-0.805*,表明 200 cm 以下土层土壤水减少与 NDVI 增加呈显著负相关关系。

参考文献:

[1] Zhang C C, Wang Y Q, Jia X X, et al. Variations in capacity and storage of plant-available water in deep profiles along a revegetation and precipitation gradient[J]. Journal of Hydrology, 2020, 581: e124401.

[2] 殷崎栋,柳彩霞,田野.基于 MODIS NDVI 数据(2001—2018)的陕西省植被绿度时空变化及人类活动影响分析[J].生态学报, 2021, 41(4): 1571-1582.

[3] 张喜荣,蔡艳蓉,赵晶,等.黄土高原水土流失造成的危害及其综合治理措施[J].安徽农业科学, 2010, 38(28): 15776-15781.

[4] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, et al. Balancing greenand grain trade[J]. Nature Geoscience, 2015, 8(10): 739-741.

[5] 张翀,王静,雷田旺,等.退耕还林工程以来黄土高原植被覆盖与地表湿润状况时空演变[J].干旱区研究, 2018, 35(6): 1468-1476.

[6] 李陆生,赵西宁,高晓东,等.黄土丘陵区不同树龄旱作枣园土壤水分动态[J].农业工程学报, 2016, 32(14): 145-152.

[7] 王艳萍,王力,韩雪,等.黄土塬区不同土地利用方式土壤水分消耗与补给变化特征[J].生态学报, 2015, 35(22): 7571-7579.

[8] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019-1022.

[9] Wang S, Fu B J, Gao G Y, et al. Soil moisture and evapo-transpiration of different land cover types in the Loess Plateau, China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(8): 2883-2892.

[10] Qiu L J, Wu Y P, Wang L J, et al. Spatiotemporal response of the water cycle to land use conversions in a typical hilly-gully basin on the Loess Plateau, China [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2017, 21(12): 6485-6499.

- [11] 尤南山,董金玮,肖桐,等.退耕还林还草工程对黄土高原植被总初级生产力的影响[J].地理科学,2020,40(2):315-323.
- [12] 胡鹏飞,李净,张彦丽,等.黄土高原水储量的时空变化及影响因素[J].遥感技术与应用,2019,34(1):176-186.
- [13] 穆兴民,徐学选,王文龙,等.黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响[J].土壤学报,2003,40(2):210-217.
- [14] Lü M X, Ma Z G, Li M X. Quantitative analysis of terrestrial water storage changes under the grain for green program in the Yellow River Basin[J].Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(3): 1336-1351.
- [15] 刘欢欢,王飞,张廷龙.CLDAS 和 GLDAS 土壤湿度资料在黄土高原的适用性评估[J].干旱地区农业研究,2018,36(5):270-276,294.
- [16] 郭永强.黄土高原植被覆盖变化归因分析及其对水储量的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [17] 邹贤才,金涛勇,朱广彬.卫星跟踪卫星技术反演局部地表物质迁移的 MASCON 方法研究[J].地球物理学报,2016,59(12):4623-4632.
- [18] 吴奇凡.黄土高原陆地水储量变化归因分析及区域尺度地下水补给[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [19] Li J J, Li Z, Lu Z M. Analysis of spatiotemporal variations in land use on the Loess Plateau of China during 1986—2010[J].Environmental Earth Sciences,75(11):e997.
- [20] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, et. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J].Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [21] 刘垚焱,曾鹏,张然,等.基于 GEE 和 BRT 的 1984—2019 年长三角生态绿色一体化发展示范区植被覆盖度变化[J].应用生态学报,2021,32(3):1033-1044.
- [22] 皮青山,席茜,周玉科.Google Earth Engine 云平台及植被遥感案例研究[J].测绘与空间地理信息,2021,44(2):38-41.
- [23] 张晨成,邵明安,王云强,等.黄土区切沟对不同植被下土壤水分时空变异的影响[J].水科学进展,2016,27(5):679-686.
- [24] 程立平,刘文兆,李志.黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征[J].生态学报,2014,34(8): 1975-1983.
- [25] 刘丙霞,任健,邵明安,等.黄土高原北部人工灌草植被土壤干燥化过程研究[J].生态学报,2020,40(11): 3795-3803.

(上接第 220 页)

- [12] 秦娟,许克福.我国城市绿地土壤质量研究综述与展望[J].生态科学 2018,37(1):200-210.
- [13] 王瑜,朱清科,赵维军,等.陕北黄土区人工林地土壤水分的垂直变化规律[J].中国水土保持科学,2015,13(6):54-60.
- [14] Santra P, Kumar M, Kumawat R N, et al. Pedotransfer functions to estimate soil water content at field capacity and permanent wilting point in hot Arid Western India[J].Indian Academy of Sciences,2018,35:1-16.
- [15] Mohanty M, Sinha N K, Painuli D K, et al. Modelling soil water contents at field capacity and permanent wilting point using artificial neural network for Indian soils[J].National Academy Science Letters, 2015, 38(5):373-377.
- [16] Ungureanu N, Vladut V, Biris S S, et al. Changes in bulk density as indicator of soil compaction[Z].International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development,2018:391-396.
- [17] 丛晓峰,刘立成,王宇超,等.不同干扰对城市绿化用地土壤物理性质的影响[J].中国农学通报,2015,31(28): 166-172.
- [18] 魏强,凌雷,王多锋,等.不同海拔甘肃兴隆山主要森林群落的土壤理化性质[J].西北林学院学报,2019,34(4):26-35.
- [19] 易小波,邵明安,赵春雷,等.黄土高原南北样带不同土层土壤容重变异分析与模拟[J].农业机械学报,2017,48(4):198-205.
- [20] 吴江琪,马维伟,李广,等.黄土高原 4 种植被类型对土壤物理特征及渗透性的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):133-138.
- [21] 张亚如,侯凯旋,崔洁亚,等.不同土层土壤容重组合对花生衰老特性及产量的影响[J].花生学报,2017,46(3):26-31.
- [22] 张笑培,杨改河,胡江波,等.不同植被恢复模式对黄土高原丘陵沟壑区土壤水分生态效应的影响[J].自然资源学报,2008,23(4):635-642.
- [23] 游松财,邸苏闯,袁晔.黄土高原地区土壤田间持水量的计算[J].自然资源学报,2009,24(3):545-552.
- [24] 蒲金涌,冯建英,姚晓红,等.甘肃黄土高原土壤农业水分常数分布特征[J].干旱地区农业研究,2008,26(3): 205-209.
- [25] 蔡福,明惠青,张淑杰,等.辽宁农田土壤田间持水量的空间变异性分析[J].气象与环境学报,2009,25(1):27-30.
- [26] 成兆金,李斌.山东省土壤水分自动站土壤水分常数评估[J].湖北农业科学,2017,56(18):3468-3483.
- [27] 邹立尧,赵秀兰.黑龙江省农田土壤水分的时空分布规律[J].黑龙江气象,2001(3):34-38.
- [28] 郭海英,马鹏里,杨兴国,等.陇东黄土高原塬区冬小麦越冬期土壤水分损耗规律浅析[J].土壤通报,2005,36(2):165-168.