

天山北坡土壤水分时空变化及驱动力分析

李泓儒, 李超凡

(南京信息工程大学地理科学学院, 南京 210044)

摘要: [目的] 分析天山北坡土壤水分的时空变化特征及其影响因素, 探讨耕地扩张对土壤水分的影响。[方法] 基于2000—2020年的1 km日尺度土壤水分数据、土地利用数据、气象数据等数据, 采用Theil-Sen Median趋势分析、Mann-Kendall显著性检验和Pearson相关系数分析, 研究0~50 cm土层的土壤水分变化, 并通过地理探测器模型探讨影响土壤水分的主要因素及其空间分异特征。[结果] 2000—2020年, 天山北坡0~50 cm土层土壤水分总体呈减少趋势, 尤其在0~10 cm土层变化最显著。不同土地利用类型下, 耕地土壤水分显著下降, 而林地和未利用地的变化不显著, 草地土壤水分呈轻微上升趋势; 土壤水分平均值依次为林地>草地>耕地>未利用地。空间分布上, 大部分地区土壤水分呈减少趋势, 但北部、南部和东部山脉区域土壤水分则有所增加。不同海拔的土壤水分普遍呈下降趋势; 随着海拔的升高, 土壤水分逐渐增加。未利用地转为耕地时, 各深度层次的土壤水分均有所增加, 0~10 cm土层尤为显著。草地转为耕地后土壤水分减少幅度较小, 而林地转为耕地则各深度层次的减少幅度较大, 特别是在40~50 cm土层。植被类型、降水和潜在蒸散发对土壤水分的影响最大, 影响力分别为0.63、0.57和0.51, 其中降水与植被类型的交互对土壤水分空间异质性影响最为显著。[结论] 天山北坡2000—2020年土壤水分呈下降趋势, 80%以上区域土壤水分减少。耕地的土壤水分显著下降, 林地、草地转为耕地时土壤水分下降。土壤水分变化主要受到降水与植被类型交互作用的显著影响。

关键词: 土壤水分; 趋势分析; 时空变化; 地理探测器

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0135-12

Analysis of Temporal and Spatial Changes of Soil Moisture and Its Driving Forces on the Northern Slope of the Tianshan Mountains

LI Hongru, LI Chaofan

(School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to analyze the temporal and spatial variation characteristics of soil moisture on the northern slope of the Tianshan Mountains and its influencing factors, with a focus on examining the impact of cropland expansion on soil moisture. [Methods] Based on 1 km daily soil moisture data, land use data, meteorological data, and other datasets from 2000 to 2020, the Theil-Sen Median trend analysis, Mann-Kendall significance test, and Pearson correlation analysis were employed to investigate changes in soil moisture within the 0–50 cm soil layer. Additionally, the Geodetector model was used to identify the main factors influencing soil moisture and their spatial differentiation characteristics. [Results] From 2000 to 2020, soil moisture in the 0–50 cm layer on the northern slope of the Tianshan Mountains exhibited an overall decreasing trend, with the most significant changes observed in the 0–10 cm layer. Under different land use types, soil moisture in croplands decreased significantly, while changes in forestlands and unused lands were not significant, and grasslands showed a slight increase in soil moisture. The average soil moisture followed the order of forestlands>grasslands>croplands>

收稿日期: 2024-11-18

修回日期: 2024-12-22

录用日期: 2025-01-09

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-03-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(42177436)

第一作者: 李泓儒(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤水分变化研究。E-mail: 18982085683@163.com

通信作者: 李超凡(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土地利用变化及其生态气候效应、环境变化与生态响应、生态过程模拟研究。E-mail: lcf8709@163.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

unused lands. Spatially, soil moisture decreased in most areas, but increased in the northern, southern, and eastern regions of the studied area. Soil moisture generally showed a downward trend across different elevation ranges, but gradually increased with rising elevation. When unused lands were converted to croplands, soil moisture increased at all depth levels, particularly at the 0–10 cm depth. The reduction in soil moisture was relatively small when grasslands were converted to croplands, whereas the decrease was more pronounced across all depth levels when forestlands were converted to croplands, particularly at the 40–50 cm depth. Vegetation type, precipitation, and potential evapotranspiration had the greatest impact on soil moisture, with influence values of 0.63, 0.57 and 0.51, respectively. Among these factors, the interaction between precipitation and vegetation type had the most significant effect on the spatial heterogeneity of soil moisture. [Conclusion] From 2000 to 2020, soil moisture on the northern slope of the Tianshan Mountains showed a declining trend, with over 80% of the area experiencing a decrease in soil moisture. Soil moisture decreased significantly in croplands, it also declined when forestlands and grasslands were converted to croplands. Soil moisture variation was primarily significantly influenced by the interaction between precipitation and vegetation type.

Keywords: soil moisture; trend analysis; spatiotemporal change; geographic detector

Received: 2024-11-18

Revised: 2024-12-22

Accepted: 2025-01-09

Online(www.cnki.net): 2025-03-26

土壤水分是干旱半干旱地区水文过程中的关键变量,并且直接影响水分和能量交换、区域水循环及气候模式^[1-2]。新疆天山北坡地处亚欧大陆内陆干旱区,是典型的生态脆弱带,其独特的地理位置和气候条件使其成为全球气候变化敏感区。该区域作为新疆重要的农业生产基地和生态屏障,土壤水分的动态变化直接影响着区域水资源分配、生态系统稳定性及农业可持续发展。随着气候变化加剧,降水的年际波动性和气温升高引发的蒸发损失对土壤水分的时空分布产生显著影响,进而影响农业生产和生态环境^[3]。土壤水分变化不仅关系到作物生长和产量预估,也可能加剧土地退化和生态脆弱性^[4]。因此,本研究旨在揭示土壤水分的时空演变规律及其驱动机制,对区域生态恢复和土地资源管理具有重要意义。

土壤水分的时空变化及其影响因素在干旱半干旱区表现出显著的空间异质性。已有研究^[5-6]表明,干旱区土壤水分受降水、蒸散发和土地利用的显著影响,植被覆盖通过调节地表蒸发和径流影响土壤水分动态。有学者^[7]指出,耕地扩张可能导致土壤水分减少,而自然植被恢复有助于水分保持。前人^[8]多研究不同土地类型的土壤水分,而忽略土地利用转化与土壤水分变化的定量关系研究,尤其是不同地类转耕地的差异化效应。以往研究^[9]多聚焦单一土层或短时间序列,缺乏多深度土层长期连续分析。

近年来,天山北坡地区的耕地扩张显著影响土壤水分,进而影响周边生态系统和荒漠化防治。耕作通过改变土壤透气性和保水能力,降低土壤水分保持能力。在干旱季节,大量灌溉用水加剧地下水

和地表水的消耗,导致土壤水分显著下降^[2]。本研究考虑到气候因素与土地利用变化的交互作用对于干旱半干旱区土壤水分动态至关重要。因此,本研究重点探讨 2000—2020 年天山北坡 0~50 cm 土层土壤水分的时空变化特征;土地利用类型转化对土壤水分的影响;气候、地形、植被和土壤属性等多因子对土壤水分变化的驱动作用及其交互效应,并为干旱区水土资源优化管理提供科学依据^[10]。本研究通过融合高分辨率遥感数据与地理探测器模型,系统解析天山北坡土壤水分的多尺度变化特征,明确各驱动因素的相对贡献与交互作用方式,重点揭示不同土地转化类型对多土层水分的差异化影响。

地面采样数据具有高精度和可靠性,能够提供具体区域和时间点的土壤水分信息,从而有效反映局部环境变化。耿燕等^[11]利用中天山北坡山区 2003—2015 年牧试站采样观测土壤水分资料发现,土壤水分主要受蒸发量、降水量、气温、日照、风速的影响。传统的地面采样方法通常依赖于有限的采样点,这些数据虽然具有高精度,但存在空间代表性差、采样点间隔长等问题。而高时空分辨率的土壤水分数据能够通过密集的空间网格和连续的时间序列,提供更全面、更精确的土壤水分信息^[12]。董金义等^[13]基于 ERA5 土壤水分数据揭示 2000—2020 年蒙古高原土壤水分空间分异特征及变化规律。

土壤水分受到多种因素的影响,包括气象、土壤和植被等影响因素,通过相关性分析,可以快速识别各个驱动因素对土壤水分变化的影响程度。白晓等^[14]采用线性回归法得到土壤水分与环境因子的相

关性发现,土壤水分与海拔高程、水分指数、植被指数为正相关。相对于相关性分析方法,地理探测器模型通过比较各驱动因素对土壤水解释释力的大小,能够更加明确地识别影响土壤水分变化的主导因子。杨雪梅等^[15]通过地理探测器的因子探测和交互探测分析发现,地区生产总值对于土壤水分影响程度最强,城镇化率最弱。因此,采用地理探测器模型进行分析的研究结果具有更高的可靠性和实用性^[16]。

基于此,本研究基于天山北坡2000—2020年土壤水分数据、土地利用数据、气象数据等数据,运用Theil-Sen Median趋势分析、Mann-Kendall显著性检验方法,探究天山北坡2000—2020年0~50 cm土层土壤水分时空变化特征、土地利用变化及其对土壤水分的影响因素,以期气候变化背景下该区域水资源的

管理、生态系统保护及干旱等自然灾害的预防提供科学依据^[17]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新疆(79°50′34″~91°33′53″E, 42°45′08″~46°13′49″N)位于亚欧大陆的内陆,天山北坡地区位于其北部(图1)^[18]。该区域处于准噶尔盆地南缘,北接古尔班通古特沙漠,南邻天山山区,涵盖乌鲁木齐市、昌吉市、阜康市、呼图壁县、玛纳斯县、石河子市、沙湾市、乌苏市、克拉玛依市、吉木萨尔县、奇台县及木垒哈萨克自治县等市县区。天山北坡地区气候独特,受地形和纬度影响,呈明显的干旱特征,降水量分布不均,气温波动较大。这些地理和气候特征共同塑造天山北坡的自然环境,并对土地利用、水资源配置及生态平衡产生深远影响。

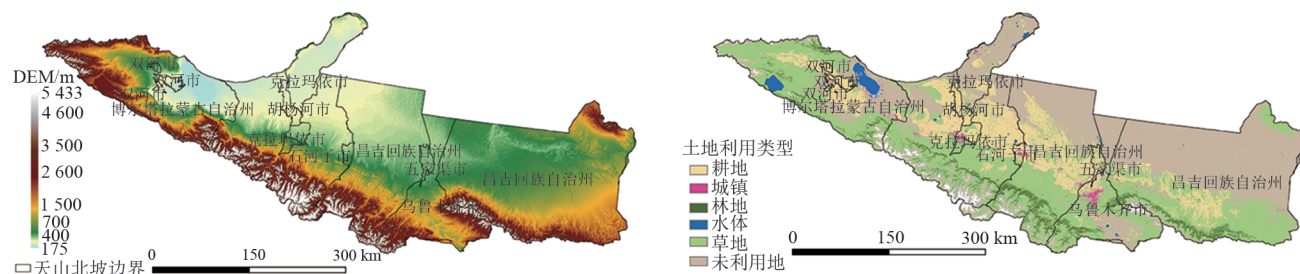


图1 天山北坡地形和土地利用类型

Fig. 1 Topography and land-use types on the northern slope of the Tianshan Mountains

1.2 数据来源

1)土壤水分数据。本研究使用国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>)的数据,具体为基于站点观测的中国1 km土壤湿度日尺度数据集(2000—2020年)^[19]。该数据源自1 648个站点观测的10层土壤湿度,覆盖2000—2020年的时间范围,以日尺度记录,深度分为10层(0~100 cm土层),具有高时空分辨率。0~50 cm土层通常是土壤水分变化最为显著的区域,尤其是在降水、蒸发等气候因素作用下,这一层土壤的水分变化能较好反映土壤的水分循环。因此,本研究选择0~50 cm土层深度的数据。土壤水分的变化通常受到气候因素(如降水、气温)和人类活动(如土地利用变化)的长期影响,年尺度数据能有效反映这些因素的累积效应。

2)气象数据。2000—2020年的月平均气温^[20]、月平均降水量^[21]及月潜在蒸散发^[22]数据来自国家青藏高原科学数据中心平台(<https://data.tpdc.ac.cn/>),空间分辨率为1 km×1 km。本研究处理得到空间分辨率为1 km的天山北坡2000—2020年逐年降水、气温和潜在蒸散发栅格数据集。

3)土地利用数据。本研究利用中国区1990—

2020年30 m土地覆盖数据集,数据来源于Google Earth Engine(GEE)平台上可获取的Landsat卫星数据。本研究依据研究区域特征,将土地利用类型划分为耕地、草地、林地和未利用地^[23]。

4)高程数据。本研究利用地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)SRTMDem 90M分辨率的原始高程数据。为研究海拔对土壤水分变化的影响,将研究区划分为低海拔(<1 000 m)、中海拔(1 000~2 000 m)、亚高海拔(2 000~4 000 m)和高海拔(4 000~6 000 m)^[24]。

5)资源类型数据。土壤数据来源于国家青藏高原科学数据中心平台(<https://data.tpdc.ac.cn/>)的基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(v1.1)^[25],提取其中关于土壤质地砂粒、粉粒和黏粒的数据。植被类型数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心平台(<https://www.resdc.cn/>)的中国100万植被类型空间分布数据。

1.3 研究方法

1.3.1 Theil-SenMedian趋势分析和Mann-Kendall显著性检验 1)Theil-Sen Median趋势分析 Theil-Sen Median趋势分析是一种非参数估计方法,该方

法受数据异常值的影响较小,能够有效揭示时间序列的变化趋势^[26]。计算公式为:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \forall j > i \quad (1)$$

式中: x_j 与 x_i 分别为第 j 和第 i 年的像元观测值; β 为时间序列的斜率。

2) Mann-Kendall 显著性检验 Mann-Kendall 检验方法可用来判断 Theil-Sen Median 趋势的显著性。相关计算公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (3)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n-5)}{18} \quad (4)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: x_j 与 x_i 分别为第 i 和第 j 年的像元观测值; n 为时间序列长度; sgn 为符号函数。在给定显著性水平 α 下,当统计量 $|Z| > u_{1-\alpha/2}$ 时,表示时间序列变化趋势显著。本研究取 $\alpha = 0.05$,相应 Z 的阈值为 ± 1.96 。

1.3.2 相关分析 本研究利用 Pearson 相关系数分析土壤水分年平均值与时间变量之间的相互关系^[27]。计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (6)$$

式中: R 为 Pearson 相关系数; x_i 、 y_i 分别为第 i 年土壤水分和时间变量; n 为研究的总年数。

1.3.3 地理探测器 地理探测器是一种用于探测地理要素的空间分异特性并阐明其背后驱动力的统计方法^[28]。本研究通过采用采样法提取各因子的栅格数据,并利用地理探测器进行因子探测、交互探测和生态探测。在地理探测器模型中, q 值衡量各因子对土壤水分空间分异的解释能力,较高的 q 值表示因子对土壤水分分异的贡献较大。本文考虑到气候因素对土壤水分的直接影响;地形因子对降水分布、蒸发速率及水分流失的影响;土地利用和植被类型的调节作用,以及土壤性质对渗透性和保水能力的影响。因此,本研究选取 11 个关键驱动因子,包括气温、潜在蒸散发、降水、坡度、坡向、

高程、植被类型、土地利用、砂粒、粉粒和黏粒。

1) 因子探测 选择因子探测器计算各因子的 q 值来量化不同因子对天山北坡土壤水分空间分异的贡献,计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{g=1}^K N_g \sigma_g^2}{N \sigma^2} \quad (7)$$

式中: K 为因子总数; N 与 N_g 分别为全区与层 g 的单元数; σ^2 与 σ_g^2 分别为全区与层 g 的 Y 值的方差; $\sum_{g=1}^K N_g \sigma_g^2$ 与 $N \sigma^2$ 分别为层内方差之和及全区总方差,取值 $0 \sim 1$ 。

2) 交互作用探测 交互作用探测用于探究 2 个影响因子共同作用时,对因变量 Y 的解释能力较单因子为增强还是减弱。首先通过因子探测计算 2 个自变量 X_1 与 X_2 别对 Y 的 q 值,得到 $q(X_1)$ 与 $q(X_2)$,然后再计算 2 个因子交互作用下的 q 值,即 $q(X_1 \cap X_2)$,最后确定交互类型。

3) 生态探测 生态探测用于分析 2 个影响因子对因变量空间分布的影响是否呈显著差异,用 G 统计量来衡量:

$$G = \frac{N_{X_1}(N_{X_2} - 1) \sum_{g=1}^K N_g \sigma_g^2}{N_{X_2}(N_{X_1} - 1) \sum_{g=1}^K N_g \sigma_g^2} \quad (8)$$

式中: N_{X_1} 、 N_{X_2} 分别为因子样本量。

1.4 数据分析

数据处理环节采用 MATLAB R2022a 平台实现多年逐日土壤水分栅格数据的批量处理与提取,通过时空融合算法构建逐月/逐年土壤水分数据集;在趋势分析层面,综合运用 Theil-Sen Median 中位数趋势估计算法与 Mann-Kendall 非参数检验法进行长时间序列的显著性趋势检测。空间可视化方面,借助 Arcgis 10.8 软件完成空间制图与地理信息处理。采用 Pearson 相关分析法在 SPSS 26.0 软件中量化土壤水分与时间变量的线性相关性。在 Arcgis 10.8 平台对各类影响因子进行标准化重分类处理,继而通过构建规则渔网采样点实现多源空间数据的协同提取,最终将标准化数据集导入地理探测器模型进行空间异质性解析,并采用 Origin 2022 软件生成热力图。

2 结果与分析

2.1 天山北坡土壤水分时空变化特征

2.1.1 2000—2020 年天山北坡土壤水分时空变化特征 由图 2 可知,天山北坡不同土层的土壤水分在 2000—2020 年普遍呈减少趋势,尤其在 0~10 cm 土层中变化显著。不同土层的土壤水分变化趋势一致,且随着土层深度的增加,土壤水分呈下降趋

势。在2000—2020年,天山北坡的0~50 cm 5个土层的平均土壤水分呈不显著减少趋势。在0~10 cm的土层中,2001—2008年和2016—2020年土壤水分显著减少($p<0.05$),2008—2016年土壤水分显著增加($p<0.05$);变化速率分别为 -2.1×10^{-4} 、 -3.9×10^{-4} 、 1.5×10^{-4} $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{a})$, R^2 分别为0.57、

0.48、0.92。在20~50 cm土层中,从2000—2014年,土壤水分显著减少($p<0.05$),变化速率分别为 -8×10^{-4} 、 -9×10^{-4} 、 -8×10^{-4} $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{a})$;2016—2020年,土壤水分再次显著减少($p<0.05$),变化速率分别为 -2.8×10^{-4} 、 -2.5×10^{-4} 、 -2.4×10^{-4} $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{a})$ 。

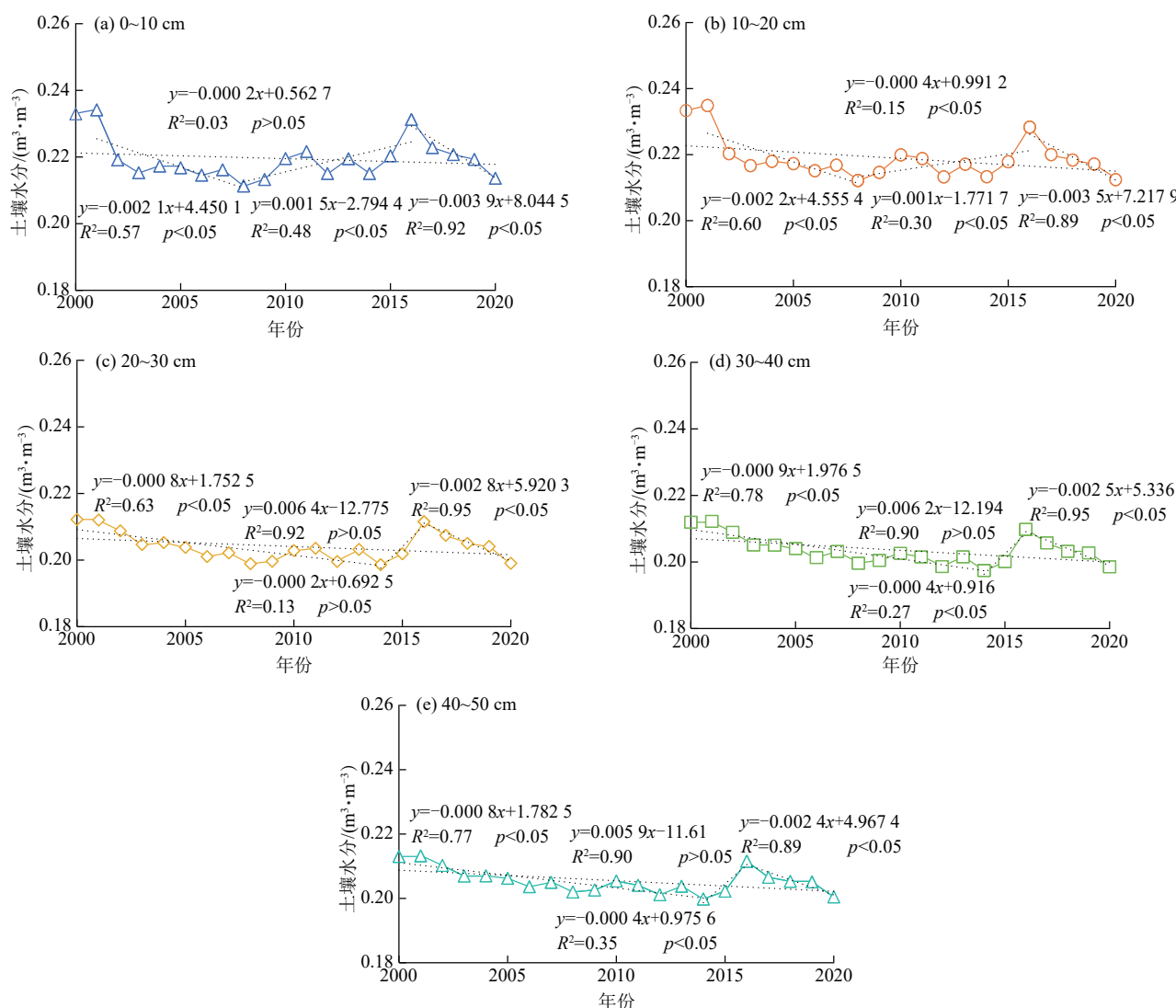


图2 2000—2020年天山北坡土壤水分时空变化

Fig. 2 Spatiotemporal variation of soil moisture on the northern slope of the Tianshan Mountains from 2000 to 2020

2000—2020年,天山北坡大部分区域的土壤水分在不同深度呈减少趋势(图3)。天山北坡地区北部未利用地区及南部、东部山脉区域土壤水分增加,而超过80%的区域则显示出减少趋势。特别是在昌吉回族自治州、呼图壁县、石河子市、沙湾市和奎屯市等地显著减少($p<0.05$)。在0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm土层中,随着土层深度增加,显著减少的范围先增大后减少,分别占12.6%、13.6%、16.6%、14.2%和11.4%;而显著增加的范围呈缩小趋势,分别占11.3%、4.9%、5.7%、5.5%和1.5%。

2.1.2 2000—2020年天山北坡不同土地利用类型土壤水分时空变化特征 2000—2020年,天山北坡不同土地利用类型对土壤水分的影响显著,土层深度和土地利用方式共同决定土壤水分的分布特征(图4)。0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm土层的土壤水分在不同土地利用类型下的平均值分别为耕地0.208、0.205、0.184、0.183、0.184 m^3/m^3 ;林地分别为0.323、0.329、0.322、0.322、0.322 m^3/m^3 ;草地分别为0.258、0.261、0.249、0.248、0.251 m^3/m^3 ;未利用地分别为0.176、0.174、0.155、0.156、0.160 m^3/m^3 。土壤水分高低为林地>草地>耕地>未利用地。耕地的土壤水分

平均值呈显著下降趋势 ($p < 0.05$), 减少速率为 $-6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{a})$, R^2 为 0.38。林地和未利用地的

土壤水分平均值变化不显著, 而草地的土壤水分平均值则呈不显著上升趋势。

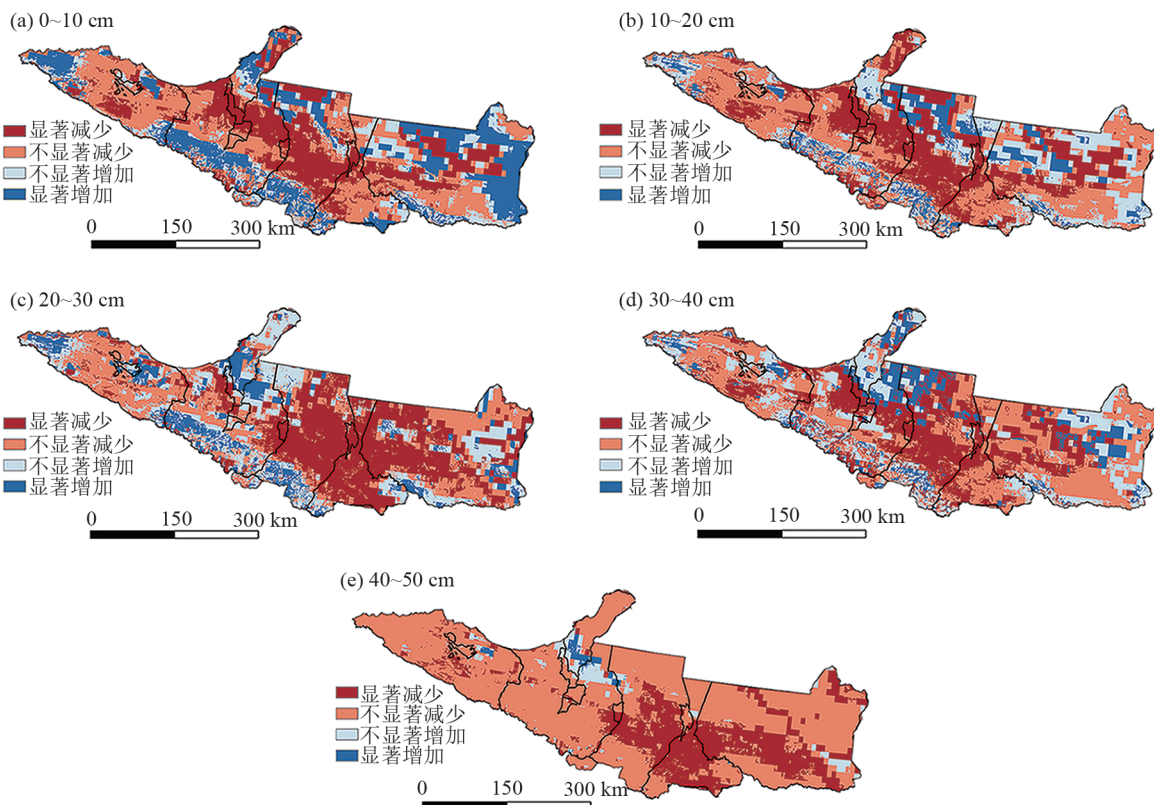


图 3 2000—2020 年天山北坡不同土壤深度土层水分变化趋势及显著性检验

Fig. 3 Trends and significance tests of soil moisture changes at different soil depths on the north slope of the Tianshan Mountains from 2000 to 2020

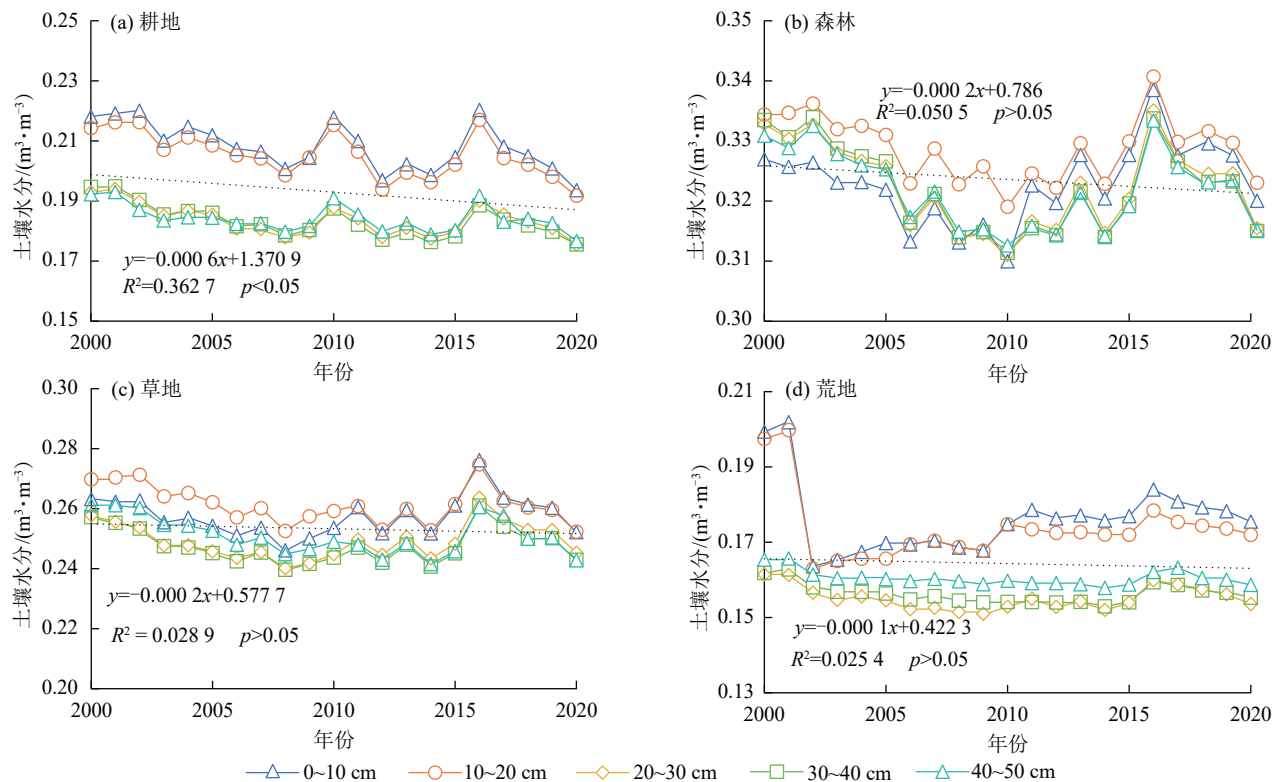


图 4 2000—2020 年天山北坡不同土地利用类型土壤水分变化

Fig. 4 Soil moisture changes under different land use types on the north slope of the Tianshan Mountains from 2000 to 2020

2000—2020 年,研究区大部分地区的土壤水分体积分数呈减少趋势,仅少数地区显示增加(表 1、图 5)。耕地整体水分下降, $(-2\sim 0)\times 10^{-3}\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{a})$ 变化速率在各土层分别占 89.58%、80.86%、75.78%、75.70%、75.99%。林地显示出较强的水分增加趋势,在 0~10、10~20、20~30 cm 土层中,土壤水分变化速率为 $(0\sim 2)\times 10^{-3}\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{a})$ 的比例相对较高,分别占 59.04%、53.12%、54.48%。草地和

未利用地表现出明显的水分减少趋势,草地在 10~20、30~40、40~50 cm 土层 $(-2\sim 0)\times 10^{-3}\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{a})$ 的土壤水分变化速率分别占 71.52%、70.97%、70.56%,未利用地在 20~30、30~40、40~50 cm 层 $(-2\sim 0)\times 10^{-3}\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{a})$ 的土壤水分变化速率分别占 70.07%、76.03%、75.18%。未利用地在克拉玛依市和昌吉回族自治州东部表现出水分的增加趋势,其余地区则减少。

表 1 2000—2020 年天山北坡不同土层深度土壤水分变化趋势像元占比

Table 1 Statistics of pixel proportions showing soil moisture trends at different soil depths on the northern slope of the Tianshan Mountains from 2000 to 2020

土地利用类型	土壤水分变化/ ($10^{-3}\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1}$)	土壤水分变化速率/%				
		0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	40~50 cm
耕地	-4~-2	1.27	4.86	0.60	2.89	4.25
	-2~0	89.58	80.86	75.78	75.70	75.99
	0~2	9.04	13.61	20.45	17.91	17.44
	2~4	0.11	0.67	3.17	3.50	2.32
林地	-4~-2	1.08	1.22	8.04	7.71	3.93
	-2~0	35.31	44.05	37.42	50.95	50.22
	0~2	59.04	53.12	54.48	40.45	45.73
	2~4	4.57	0.61	0.06	0.89	0.12
草地	-4~-2	1.98	2.26	4.53	5.83	6.43
	-2~0	61.48	71.52	66.07	70.97	70.56
	0~2	35.50	26.08	28.02	20.88	20.83
	2~4	1.04	0.14	1.39	2.31	2.18
未利用地	-4~-2	12.83	15.92	3.05	5.08	8.46
	-2~0	43.26	47.54	70.07	76.03	75.18
	0~2	34.09	28.31	22.79	13.34	13.82
	2~4	9.82	8.24	4.09	5.55	2.54

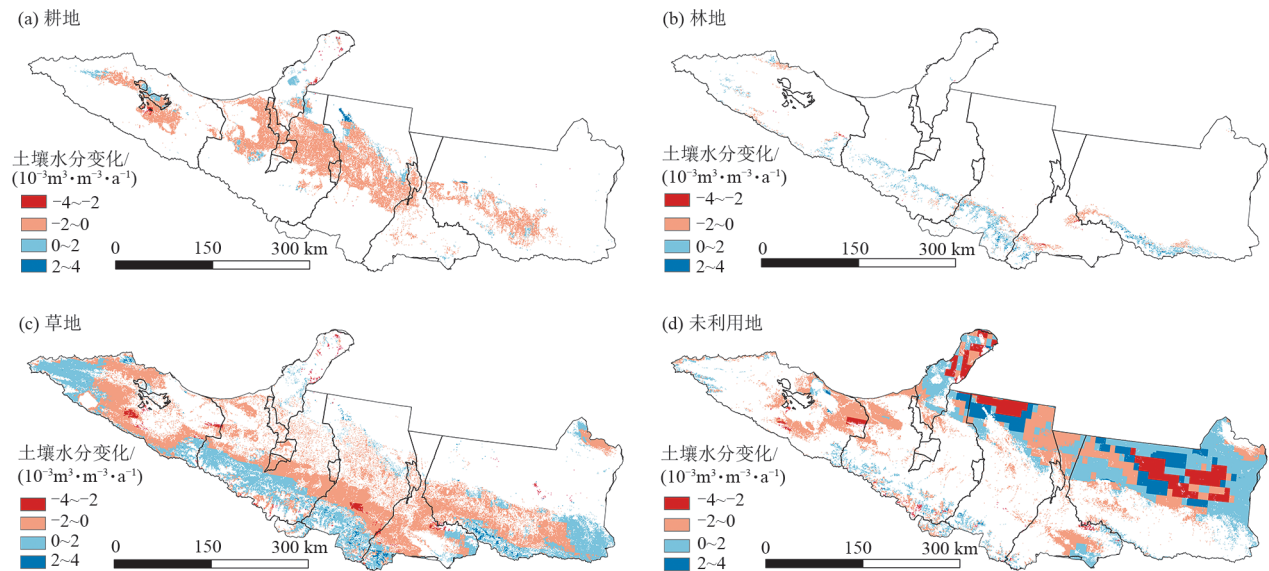


图 5 2000—2020 年天山北坡不同土地利用类型土壤水分变化趋势

Fig. 5 Trends in soil moisture changes under different land-use types on the northern slope of the Tianshan Mountains from 2000 to 2020

2.1.3 不同海拔区间的土壤水分时空变化特征
天山北坡不同海拔区间的土壤水分均呈下降趋势(图6),其水分体积分数为高海拔>亚高海拔>中海拔>低海拔。在低海拔和中海拔区域,2000—2010年土壤水分变化幅度较小,而在2010—2020年则表现为先上升后下降,且此趋势在0~10、10~

20 cm土层中尤为显著。亚高海拔和高海拔区域的土壤水分时间变化趋势较为平稳,整体水分体积分数保持稳定。在低海拔和中海拔区域,0~10 cm土层的水分体积分数高于其他土层,而在亚高海拔和高海拔区域,0~10 cm土层的水分体积分数则低于其他土层。

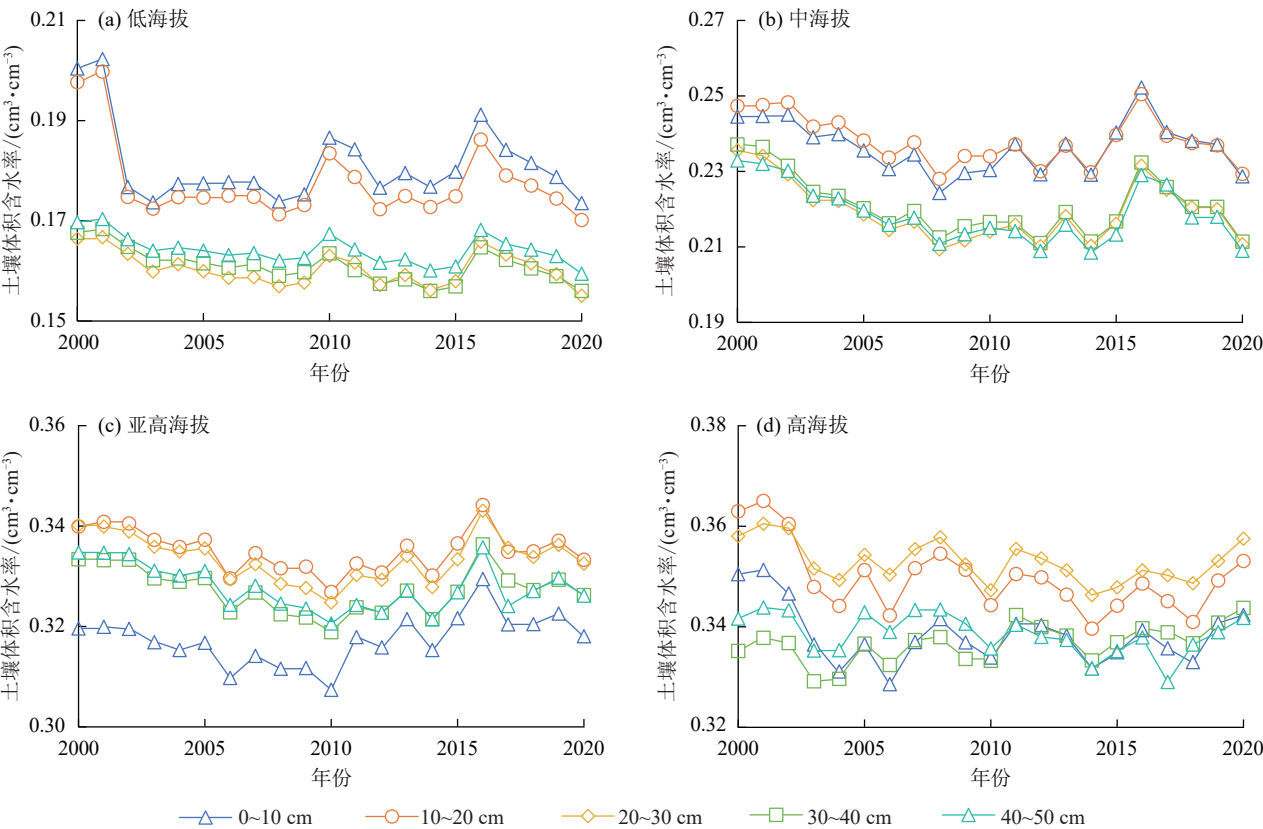


图6 2000—2020年天山北坡不同海拔高度土壤水分变化

Fig. 6 Soil moisture changes at different elevation on the northern slope of the Tianshan Mountains from 2000 to 2020

2.1.4 2000—2020年天山北坡多种地类转为耕地土壤水分变化特征
2000—2020年,天山北坡不同土地利用类型向耕地的转化情况揭示区域土地利用变化的空间分布特征(表2、图7)。其他地类转耕地的面积依次为草地9 424.87 km²、未利用地1 711.44 km²和林地27.65 km²。未利用地转耕地的区域主要集中在克拉玛依市周边,表现出局部集聚的特点;草地转耕地则广泛分布于天山北坡东部至西部;林地转耕地主要集中在博尔塔拉蒙古自治州山脉附近,其他地区的转化分布较为分散。

在不同土层深度(0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm)不同土地利用转化对土壤水分的影响存在显著差异,具体表现为未利用地、草地和林地转耕地后水分变化的程度和趋势不同(图8)。未利用地转为耕地后,各深度层土壤水分均有所增加,变化百分比分别为34.04%、32.66%、31.93%、

29.38%、28.78%。草地转耕地后土壤水分的减少幅度较小,变化百分比分别为-17.19%、-18.13%、-19.23%、-21.63%、-22.55%。林地转耕地时,土壤水分减少最为明显,尤其在40~50 cm土层深度,变化百分比分别为-30.96%、-30.65%、-32.54%、-37.49%、-38.08%。不同土地利用转化对土壤水分影响差异明显,草地和林地转耕地时,水分变化绝对值随土层深度增加而增大,而未利用地转耕地的变化则随土层深度增加而减小。

表2 天山北坡4期土地利用转移矩阵

Table 2 Land use transition matrix for four periods on the northern slope of the Tianshan Mountains km ²			
年份	林地转耕地	草地转耕地	未利用地转耕地
2000—2005	2.52	2 233.51	615.24
2005—2010	7.82	3 299.69	717.97
2010—2015	11.09	2 907.65	310.87
2015—2020	6.22	984.02	67.36

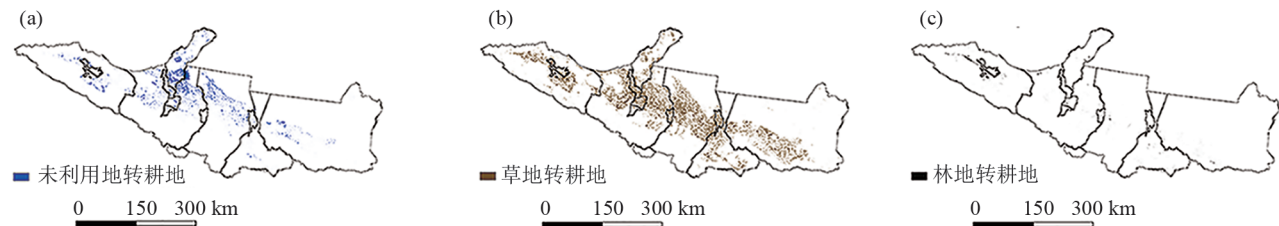


图 7 2000—2020 年天山北坡未利用地、草地、林地转化为耕地空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of unused lands, grasslands and forestlands converted to croplands on the northern slope of the Tianshan Mountains from 2000 to 2020

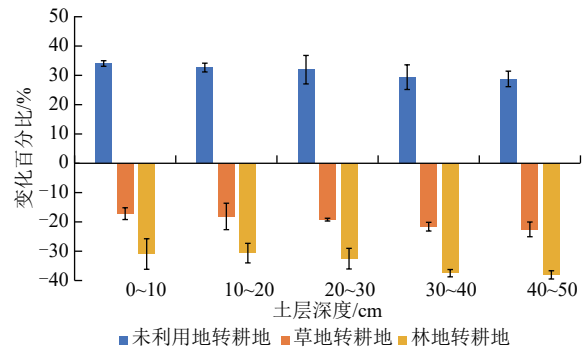


图 8 2000—2020 年天山北坡未利用地、草地、林地转化为耕地土壤水分总变化

Fig. 8 Total changes of soil moisture in unused lands, grasslands, and forestlands converted to croplands on the north slope of the Tianshan Mountains from 2000 to 2020

2.2 天山北坡土壤水分变化影响因素分析

2.2.1 探测因子影响力 2000—2020 年,地理探测器模型揭示气温、降水、潜在蒸散发等多种因子对土壤水分的影响程度及其动态变化(表 3)。植被类型、降水和潜在蒸散发的影响力显著高于其他因子,其多年平均 q 分别为 0.63、0.57 和 0.51,而坡向的 q 最低,仅为 0.01。植被类型和降水的 q 保持稳定,潜在蒸散发虽有波动但总体稳定。其他因子的 q 值均超过 0.2,其中砂粒、粉粒和黏粒的 q 为 0.45~0.53,表明土壤质地对土壤水分变化有一定影响,多年平均 q 分别为 0.48、0.50、0.43;气温长期平均 q 为 0.45,且在 2010—2020 年逐渐增加,表明其对土壤水分的影响在增强。

表 3 天山北坡土壤水分探测因子的 q 值

Table 3 q -values of soil moisture detection factors on the north slope of the Tianshan Mountains

探测因子	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	多年平均
气温	0.46	0.41	0.37	0.48	0.54	0.45
潜在蒸散发	0.51	0.49	0.45	0.52	0.57	0.51
降水	0.63	0.57	0.53	0.60	0.52	0.57
坡度	0.45	0.40	0.36	0.43	0.48	0.42
坡向	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
高程	0.49	0.46	0.41	0.50	0.58	0.49
植被类型	0.65	0.62	0.60	0.63	0.63	0.63
土地利用	0.25	0.29	0.28	0.29	0.28	0.28
砂粒	0.50	0.50	0.45	0.49	0.48	0.48
粉粒	0.52	0.51	0.46	0.51	0.53	0.50
黏粒	0.46	0.44	0.39	0.44	0.44	0.43

2.2.2 交互探测和生态探测 交互检测结果表明,降水和植被类型的交互作用对土壤水分空间异质性的影响最为显著(图 9)。在不同深度土层,平均解释率最高的 4 组双因子交互为:植被类型∩降水、植被类型∩砂粒、植被类型∩粉粒和植被类型∩黏粒,均达到 0.70。坡向∩土地利用的交互作用最弱,仅为 0.25。生态探测结果显示,粉粒与潜在蒸散发、粉粒与高程、砂粒与气温,以及潜在蒸散发与高程之间对土壤水分的空间分异没有

显著性差异,而其余因子间则呈显著性差异。

3 讨论

本研究表明,2000—2020 年天山北坡不同深度的土壤水分均呈一致下降趋势,尤其在 0~10 cm 土层深度的变化最为显著。此现象与王瑾杰等^[5]的研究结果一致。本研究发现,尽管大部分区域水分呈下降趋势,部分地区(尤其是北部未利用地区)土壤水分有所回升。未利用地在土地开发强度降低后可能经历植被的自然演替,植被覆盖度的增加可能

促进土壤水分的蓄积^[29]。北部未利用地向耕地的转变也可能通过短期灌溉增加局部土壤水分。未

来若对这些地区实施大规模开发(如耕地扩张),可能再次引发土壤水分的下降。

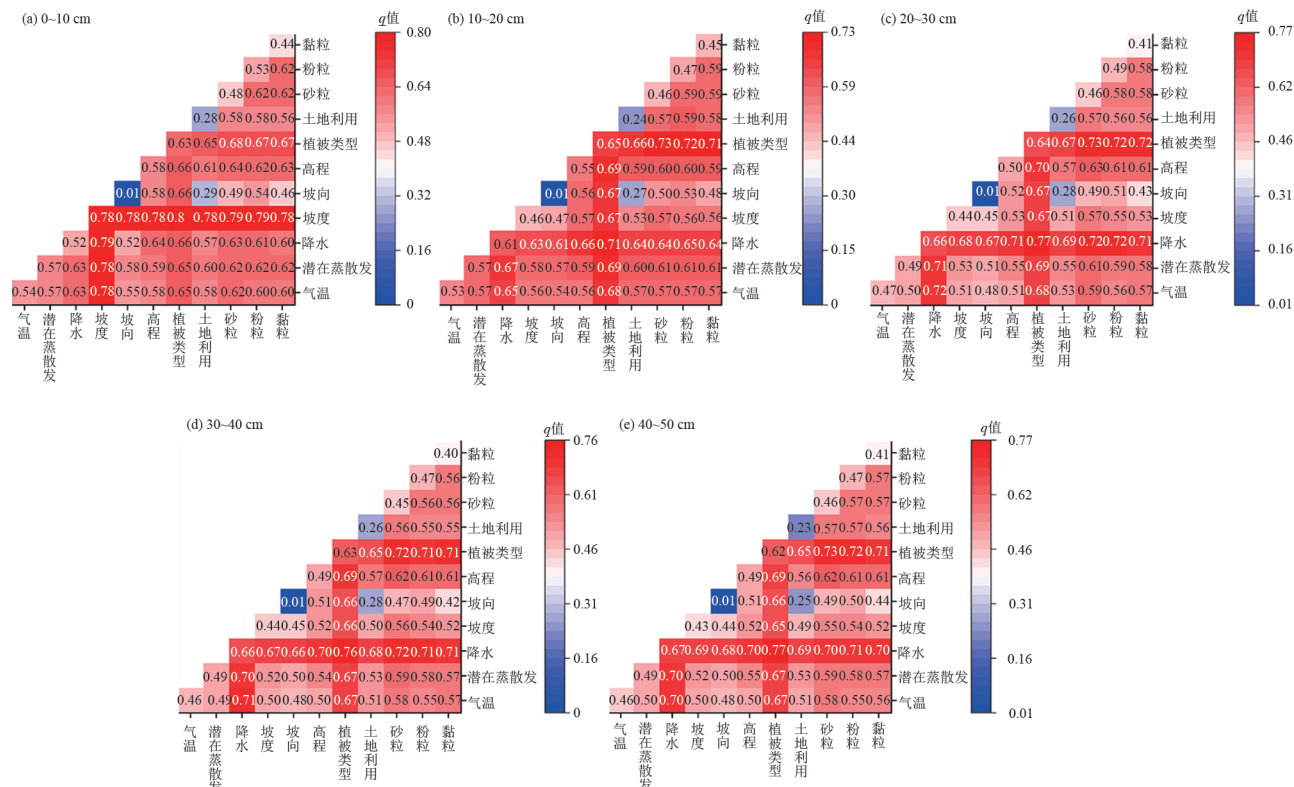


图9 2000—2020年天山北坡不同土壤深度土壤水分影响因素交互探测

Fig.9 Interaction detection of soil moisture influencing factors at different soil depths on the north slope of the Tianshan Mountains from 2000 to 2020

本研究表明,天山北坡耕地的土壤水分呈显著下降趋势,且其水分减少程度远大于林地和草地。该趋势与朱美玲等^[30]的研究结果一致。耕地的灌溉活动虽然能短期内有效补充土壤水分,但长期过度依赖可能导致土壤盐渍化和土地退化,严重时甚至无法恢复耕种,从而引起土壤水分大量减少^[31]。该问题在依赖地下水灌溉的区域尤为显著。针对盐碱化风险较高的区域,必须加强土壤监测,实施合理的土地轮作和休耕策略,以减少土壤盐渍化现象^[32]。

本研究发现,耕地扩张是土壤水分减少的主要因素,尤其是在草地和林地转为耕地时,土壤水分的减少幅度较大。该发现与刘晓笛^[33]和刘黎^[34]的研究结果一致。在干旱半干旱地区,草地和林地原有的植被根系网络对水分保持能力起到关键作用,而耕地开发破坏这种网络,增加土壤水分的蒸发和径流流失^[6]。草地和林地转向耕地的转化对水分的负面影响在本研究中表现尤为显著。未来土地利用规划中,应尽量避免大规模开发自然草地和林地,优先保护其生态功能,以维持土壤水分的稳定^[35]。

本研究表明,植被类型、降水和潜在蒸散发是影响土壤水分的主要因素,其中植被的影响最大。姚雪玲

等^[36]和陈娟等^[37]的研究也强调植被在土壤水分空间分布中的关键作用。交互作用分析显示,降水与植被类型在天山北坡的显著作用。不同植被类型在水分吸收、蒸发和土壤保持能力方面存在显著差异,直接影响到水资源的利用效率和生态系统的稳定性^[8]。在未来生态修复规划中,应结合区域降水条件选择适宜的植被类型,以最大化土壤水分的保持效益。

本研究表明,气温升高显著加剧天山北坡土壤水分的蒸发,导致水分逐年下降。与CAI等^[38]和张霞等^[39]的研究结果一致。气温对土壤水分的影响逐年增强,影响力(q 值)从0.37上升至0.54。此发现揭示该区域在未来气候变化条件下,土壤水分可能进一步加速流失,增加土壤退化和生产力下降的风险^[4]。

尽管土壤质地对天山北坡土壤水分的空间分异影响较小,但在双因子交互分析中,植被与土壤质地(如粉粒、砂粒、黏粒)之间的交互作用显著。CRAVE等^[40]研究发现,土壤质地通过影响土壤水力特性来调控土壤水分;WANKMÜLLER等^[41]研究表明,沙土生态系统对土壤干旱的敏感性较高。在天山北坡的干旱半干旱环境中,土壤质地的差异性直

接影响区域土壤水分的分布及其变化趋势^[9]。因此,干旱和半干旱地区的植被恢复和土地利用规划应该结合土壤质地特点,优先选择适合的植被类型,以提高水分保持能力^[42]。

未来的研究应结合气候模型和土地利用预测,探索不同气候情景下土壤水分的变化趋势,尤其是在气候变化日益加剧的干旱半干旱区^[43]。未来可进一步探讨土地利用变化对水分保持机制的长期影响,并优化生态恢复策略,以提高干旱区水土资源的利用效率。

4 结论

1)土壤水分呈减少趋势,尤其在0~10 cm土层中。虽然北部未利用地区和部分山地水分有所增加,但80%以上区域土壤水分减少。不同海拔区间的土壤水分普遍呈下降趋势;随着海拔的升高,土壤水分逐渐增加。

2)耕地、草地和未利用地的土壤水分呈减少趋势,林地水分增加。未利用地转为耕地时水分有所增加,草地和林地转耕地时土壤水分在所有土层均减少。

3)天山北坡土壤水分受多种因素共同影响,植被类型、降水和潜在蒸散发是主要的影响因子。降水与植被类型的交互作用对土壤水分的空间异质性影响最为显著。

参考文献:

- [1] HAN G L, WANG J L, PAN Y Y, et al. Temporal and spatial variation of soil moisture and its possible impact on regional air temperature in China [J]. *Water*, 2020, 12(6):e1807.
- [2] 陈斌,鲁延芳,占玉芳,等.荒漠绿洲过渡带土壤水分空间分布特征及对植被的影响[J].西北林学院学报, 2023, 38(2):25-32.
CHEN B, LU Y F, ZHAN Y F, et al. Spatial distribution characteristics of soil moisture and its influence on vegetation in desert-oasis ecotone [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023, 38(2):25-32.
- [3] LEGATES D R, MAHMOOD R, LEVIA D F, et al. Soil moisture: A central and unifying theme in physical geography [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2011, 35(1):65-86.
- [4] 包青岭,丁建丽,王敬哲,等.基于VIC模型模拟的干旱区土壤水分及其时空变化特征[J].生态学报, 2020, 40(9):3048-3059.
BAO Q L, DING J L, WANG J Z, et al. Spatio-temporal variation of soil moisture in arid area based on VIC land surface model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(9):3048-3059.
- [5] 王瑾杰,丁建丽,张喆.2008—2014年新疆艾比湖流域土壤水分时空分布特征[J].生态学报, 2019, 39(5):1784-1794.
WANG J J, DING J L, ZHANG Z. Temporal-spatial dynamic change characteristics of soil moisture in Ebinur Lake basin from 2008 to 2014 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(5):1784-1794.
- [6] 易成功.2000-2020年中国干旱半干旱区土壤湿度时空变化及影响因素[D].河南 信阳:信阳师范学院, 2022.
YI C G. Spatial-temporal variation of soil moisture and its influencing factors in arid and semi-arid areas of China from 2000 to 2020 [D]. Xinyang Henan: Xinyang Normal University, 2022.
- [7] 白晓,贾小旭,邵明安,等.黄土高原北部土地利用变化对长期土壤水分平衡影响模拟[J].水科学进展, 2021, 32(1):109-119.
BAI X, JIA X X, SHAO M A, et al. Simulating long-term soil water balance in response to land use change in the Northern China's Loess Plateau [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1):109-119.
- [8] 施政乐.晋西黄土区不同地类土壤水分时空变化及影响因素研究[D].北京:北京林业大学, 2022.
SHI Z L. Study on the spatiotemporal variation and influencing factors of soil moisture in different land types in the loess region of western Shanxi [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.
- [9] 乔斌,陈国茜,石明明,等.不同土地利用方式下土壤水分动态及对降水的响应:以青海省互助县浅山旱地为例[J].中国农学通报, 2020, 36(13):115-123.
QIAO B, CHEN G Q, SHI M M, et al. Soil moisture dynamics and response to precipitation under different land use patterns: A case study of shallow mountain dry land in Huzhu, Qinghai [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(13):115-123.
- [10] YANG L, CHEN L D, WEI W, et al. Comparison of deep soil moisture in two re-vegetation watersheds in semi-arid regions [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 513:314-321.
- [11] 耿燕,哈不拉哈提,陈亮,等.中天山北坡土壤水分的时空变化特征与其气象要素的关系[J].农业与技术, 2018, 38(2):226-229, 251.
GENG Y, HABULAHAT, CHENG L, et al. Relationship between temporal and spatial variation characteristics of soil moisture and its meteorological factors on the northern slope of the middle Tianshan Mountains [J]. *Agriculture and Technology*, 2018, 38(2):226-229, 251.
- [12] ZHANG K, WANG Q Q, CHAO L J, et al. Ground observation-based analysis of soil moisture spatiotemporal variability across a humid to semi-humid transitional zone in China [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574:903-914.

- [13] 董金义, 罗敏, 孟凡浩, 等. 蒙古高原土壤水分时空格局演变特征分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 110-121.
DONG J Y, LUO M, MENG F H, et al. Characteristics of spatiotemporal pattern evolution of soil moisture in the Mongolian Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 110-121.
- [14] 白晓, 王忠富, 杨礼箫. 黑河上游土壤水分与遥感环境因子相关性分析[J]. 遥感信息, 2016, 31(6): 121-127.
BAI X, WANG Z F, YANG L X. Correlation analysis between soil moisture and environmental factors by remote sensing in upper reach of Heihe River watershed [J]. Remote Sensing Information, 2016, 31(6): 121-127.
- [15] 杨雪梅, 王让会. 基于地理探测器的柯柯牙工程区土壤水分变化特征及驱动力分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(26): 11148-11157.
YANG X M, WANG R H. Analysis of soil moisture variation characteristics and driving force in Kekeya area based on geographic detector[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(26): 11148-11157.
- [16] 王伟, 阿里木·赛买提, 吉力力·阿不都外力. 基于地理探测器模型的中亚 NDVI 时空变化特征及其驱动因子分析[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(4): 32-40.
WANG W, SAIMEITI A, ABUDUWEILI J. Analysis of spatiotemporal variation characteristics and driving factors of NDVI in central Asia based on the geographical detector model [J]. Remote Sensing of Land and Resources 2019, 31(4): 32-40.
- [17] 朱磊, 罗格平, 许文强, 等. 干旱区绿洲城市土地利用变化及其生态环境效应分析: 以乌鲁木齐市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(3): 13-19.
ZHU L, LUO G P, XU W Q, et al. Changes of land-use and environmental effect in arid oasis city: A case study of Urumqi in Xinjiang [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(3): 13-19.
- [18] 葛石冰, 宋晓君, 陈润, 等. 近 30 年天山北坡改进型遥感生态指数时空变化及其驱动因素[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(7): 865-876.
GE S B, SONG X J, CHEN R, et al. The spatiotemporal changes and driving factors of ERSEI on the northern slope of Tianshan Mountains in the past 30 years [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024, 40(7): 865-876.
- [19] LI Q L, SHI G S, SHANGGUAN W, et al. A 1 km daily soil moisture dataset over China using in situ measurement and machine learning [J]. Earth System Science Data, 2022, 14(12): 5267-5286.
- [20] PENG S Z, GANG C C, CAO Y, et al. Assessment of climate change trends over the Loess Plateau in China from 1901 to 2100 [J]. International Journal of Climatology, 2018, 38(5): 2250-2264.
- [21] PENG S Z, DING Y X, LIU W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017 [J]. Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [22] DING Y X, PENG S Z. Spatiotemporal change and attribution of potential evapotranspiration over China from 1901 to 2100 [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2021, 145(1/2): 79-94.
- [23] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [24] 龙晓君, 李小建. 基于多源数据的中国地形海拔分级指标调整研究[J]. 地理科学, 2017, 37(10): 1577-1584.
LONG X J, LI X J. Mountain attitude classification indexes adjustment based on multi-source data in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(10): 1577-1584.
- [25] FISCHER G, NACHTERGAELE F, PRIELER S, et al. Global agro-ecological zones assessment for agriculture (GAEZ 2008) [J]. IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy, 2008, e10.
- [26] MILICH L, WEISS E. GAC NDVI interannual coefficient of variation (CoV) images: Ground truth sampling of the Sahel along north-south transects [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(2): 235-260.
- [27] CHU H S, VENEVSKY S, WU C, et al. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River basin from 1982 to 2015 [J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 2051-2062.
- [28] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [29] YANG L, WEI W, CHEN L D, et al. Response of temporal variation of soil moisture to vegetation restoration in semi-arid Loess Plateau, China [J]. Catena, 2014, 115: 123-133.
- [30] 朱美玲, 刘军. 西北干旱区农业高效节水区域效益评价指标体系研究 [J]. 节水灌溉, 2016(2): 95-100.
ZHU M L, LIU J. Study on evaluation index system of regional benefit of agricultural high efficiency and water saving in arid area of northwest China [J]. Water Saving Irrigation, 2016(2): 95-100.
- [31] PULIDO-BOSCH A, RIGOL-SANCHEZ J P, VALLE-JOS A, et al. Impacts of agricultural irrigation on groundwater salinity [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(5): e197.
- [32] SINGH A. Soil salinization management for sustainable development: A review [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 277: e111383.

- the surface phenomena of mineral crystals [J]. *Engineering Geology*, 2021, 294: e106366.
- [17] 侯涛, 徐仁扣. 胶体颗粒表面双电层之间的相互作用研究进展[J]. *土壤*, 2008, 40(3): 377-381.
- HOU Y, XU R K. Progresses on interactions between electric double layers on colloid surface[J]. *Soils*, 2008, 40(3): 377-381.
- [18] 余冬立, 韩笑, 孙泉沁, 等. 基于CT扫描的滨海土壤孔隙空间网络表征与渗流模拟[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(5): 308-315.
- SHE D L, HAN X, SUN X Q, et al. Coastal soil pore space network characterization and seepage simulation based on CT scanning [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(5): 308-315.
- [19] LI S, LI H, XU C Y, et al. Particle interaction forces induce soil particle transport during rainfall[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(5): 1563-1571.
- [20] OZA H P, OZA H P. *Soil mechanics and foundation engineering*[M]. Anand: Charotar Book Stall, 1969.
- (上接第146页)
- [33] 刘晓笛. 基于SWAT模型的和田河上游气候和土地利用变化的水文效应模拟[D]. 山东 曲阜: 曲阜师范大学, 2019.
- LIU X D. Hydrological effect simulation of climate and land use change in the upper reaches of Hotan River based on SWAT model[D]. Qufu Shandong: Shangdong Qufu Normal University, 2019.
- [34] 刘桀. 黄土高原植被恢复对土壤水分的影响研究[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2022.
- LIU C. Effects of vegetation restoration on soil moisture in Loess Plateau [D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2022.
- [35] 张宝庆, 邵蕊, 赵西宁, 等. 大规模植被恢复对黄土高原生态水文过程的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(3): 594-606.
- ZHANG B Q, SHAO R, ZHAO X N, et al. Effects of large-scale vegetation restoration on eco-hydrological processes over the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, 28(3): 594-606.
- [36] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J]. *生态学报*, 2012, 32(16): 4961-4968.
- YAO X L, FU B J, LÜ Y H. Spatial patterns of soil moisture at transect scale in the Loess Plateau of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 4961-4968.
- [37] 陈娟, 宋乃平, 陈林, 等. 荒漠草原不同覆被类型土壤水分动态及其对降水的响应[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 198-206.
- CHEN J, SONG N P, CHEN L, et al. Soil moisture dynamics and its response to precipitation in different cover types of desert steppe[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(6): 198-206.
- [21] 雷洁, 张国明, 刘连友, 等. 土壤抗剪强度测定与影响因素研究进展[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(4): 486-492.
- LEI J, ZHANG G M, LIU L Y, et al. Measuring soil shear strength and impact factors [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2016, 52(4): 486-492.
- [22] 刘子振, 言志信, 凌松耀, 等. 非饱和土边坡抗剪强度的力学参数影响及灵敏度分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(11): 4508-4513.
- LIU Z Z, YAN Z X, LING S Y, et al. Sensitivity analysis and influence of mechanical parameters on shear strength of unsaturated soil slope [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(11): 4508-4513.
- [23] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 34-37.
- LIU D H, LI Y. Mechanism of plant roots improving resistance of soil to concentrated flow erosion [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2003, 17(3): 34-37.
- [38] CAI J J, ZHOU B T, CHEN S Y, et al. Spatial and temporal variability of soil moisture and its driving factors in the northern agricultural regions of China [J]. *Water*, 2024, 16(4): e556.
- [39] 张霞, 李明星, 马柱国. 近30年全球干旱半干旱区的蒸散变化特征[J]. *大气科学*, 2018, 42(2): 251-267.
- ZHANG X, LI M X, MA Z G. Evapotranspiration variability over global arid and semi-arid regions from 1982 to 2011 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(2): 251-267.
- [40] CRAVE A, GASCUEL-ODOUX C. The influence of topography on time and space distribution of soil surface water content [J]. *Hydrological Processes*, 1997, 11(2): 203-210.
- [41] WANKMÜLLER F P, DELVAL L, LEHMANN P, et al. Global influence of soil texture on ecosystem water limitation [J]. *Nature*, 2024, 635(8039): 631-638.
- [42] ZHOU W X, LI C J, WANG S, et al. Effects of vegetation restoration on soil properties and vegetation attributes in the arid and semi-arid regions of China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 343: e118186.
- [43] FU Q, LI B, HOU Y, et al. Effects of land use and climate change on ecosystem services in Central Asia's arid regions: A case study in Altay Prefecture, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607: 633-646.