

# 基于高分遥感影像的亚高寒 草甸土壤水分含量反演

张起鹏,田富恒,卓玛兰草,赵頔琛

(甘肃民族师范学院历史文化系,甘肃 合作 747000)

**摘要:**通过高分卫星遥感影像计算植被供水指数来反演亚高寒草甸土壤水分含量,结合高分辨率遥感影像(GF-2)和中分辨率的遥感影像(Landsat-7)进行土壤水分反演模型建模验证,揭示高分遥感影像结合植被供水指数法在青藏高原东北缘亚高寒草甸草原上的适用性,同时分析研究区土壤水分分布及其影响因素。基于高分二号(GF-2)、Landsat-7影像数据,以甘南藏族自治州当周草原为研究区,利用植被供水指数(VSWI, vegetation supply water index)构建土壤水分反演模型得到研究区土壤水分含量反演图,通过半方差函数及主成分分析法探索研究区土壤水分空间分布及影响因素。结果表明:研究区土壤水分含量分布状态呈现出一定程度的空间变异,体现在整个研究区内以及各个地块之间,土壤水分含量主要介于0.11%~60.44%之间;土壤水分含量与坡度、海拔、坡向、NDVI、地表温度均呈正相关关系,分布主要受NDVI、坡向、坡度、海拔的影响。综上,利用植被供水指数法结合高分遥感影像监测土壤水分含量是可行的,基于GF-2遥感影像所建立的模型拟合度最优,较Landsat-7遥感影像更具优势。

**关键词:**土壤水分含量;植被供水指数;土壤水分空间变异;青藏高原

中图分类号:S127; S152.7 文献标志码:A

## Soil moisture content inversion of subalpine meadow based on high-resolution remote sensing image

ZHANG Qipeng, TIAN Fuheng, Zhuomalancao, ZHAO Dichen

(Gansu Normal College for Nationalities, Hezuo, Gansu 747000, China)

**Abstract:** This study aims to estimate soil moisture content in the subalpine meadow of the northeastern margin of the Qing-Zang Plateau using high-resolution satellite remote sensing images and the vegetation supply water index (VSWI). The suitability of combining high-resolution remote sensing images (GF-2) with the VSWI method is explored, and the distribution of soil moisture content and its influencing factors are analyzed. The study uses GF-2 and Landsat-7 satellite images to construct a soil moisture inversion model based on the VSWI. The model is applied to the grasslands of Gannan Tibetan Autonomous Prefecture to obtain a soil moisture inversion map. The spatial distribution of soil moisture and its influencing factors are analyzed using semivariogram and principal component analysis. The findings indicated a certain degree of spatial variability in soil moisture content within the study area and different positions, ranging from 0.11% to 60.44%. Soil moisture content showed a positive correlation with slope, elevation, aspect, NDVI, and surface temperature, the distribution of soil moisture content was affected by NDVI, aspect, slope, and elevation. Using the vegetation water supply index method combined with high-resolution remote sensing image to inversion soil moisture content was feasible, and the model established based on GF-2 remote sensing image had the best fitting degree and is more advantageous than Landsat-7 remote sensing image.

**Keywords:** soil moisture content; vegetation supply water index; spatial variability of soil moisture; Qing-Zang Plateau

在生态系统类型中,草地占陆地总面积的 25%,大约 30%的净初级生产力由草地生态系统所贡献,草地生态系统所提供的涵养水源、保持水土、调节气候的作用对于生态环境和人类社会可持续发展具有重要意义。青藏高原是我国天然草地分布面积最大且最集中的区域<sup>[1]</sup>,占全国草地总面积的 1/3,其分布最为广泛的植被类型是高寒草甸,大约占有 46.7%的草地面积,是我国草地生态系统重要的组成成分<sup>[2]</sup>。作为陆地水资源的重要组成部分,土壤水分在陆面研究过程中具有重要意义,特别是在青藏高原地区,由于其“高”与“寒”的自然特征,使该地区的生态环境更加脆弱,对气候变化和人类活动的响应也更加敏感<sup>[3]</sup>。有研究指出青藏高原的高寒草甸生态系统碳吸收开始日期和净生态系统初始生产力受到土壤水分的影响<sup>[4]</sup>。同时,研究土壤水分对了解陆地生态系统水分利用率,进而预测生态系统对气候变化的响应具有重要意义<sup>[5]</sup>,土壤水分对区域降水以及短期的气候变化也有重要影响<sup>[6]</sup>。土壤水分含量在不同时期和位置表现出不同的空间异质性,这是受到多种环境因子共同作用的结果,主要涉及土壤性质、植被、地形因子等<sup>[7]</sup>。Mei 等<sup>[8]</sup>对黄土高原不同时期不同土层土壤水分的影响因子分析也证明了此观点。Jared 等<sup>[9]</sup>认为土壤水分的时空变异可分为大尺度与小尺度上的变异,大尺度上的变异主要是由气候引发的降水与地面蒸发导致,小尺度上的变异主要取决于区域的地形、植被、土壤条件等。因此,监测了解和掌握区域的土壤水分含量分布变化情况,对于科学合理管理利用资源,保护生态环境,提高农牧业生产水平,都具有十分重要的意义。

随着卫星遥感技术的发展,Price 等<sup>[10]</sup>提出了表观热惯量(*ATI*, apparent thermal inertia)的概念,可以通过遥感图像获取热惯量进而计算土壤水分。除热惯量法外,在热红外遥感的基础上发展了作物水分胁迫指数(*CWSI*, crop water stress index)、温度条件植被指数(*TCI*, vegetation condition index)等定性表征地表相对干湿状况的指数。基于此,出现了联合光学与热红外遥感信息的光学/热红外方法。Nemani 等<sup>[11]</sup>首次将温度和植被指数结合起来,此后出现了反映植被覆盖区的植被生长状况和生境供水情况的植被供水指数(*VSWI*, vegetation supply water index)<sup>[12]</sup>、温度植被干旱指数(*TVDI*, temperature vegetation drought index)<sup>[13]</sup>等。Meng 等<sup>[14]</sup>对温度植被干旱指数模型进行了修改,使其在干旱监测方面的准确性明显提高。李亮亮等<sup>[15]</sup>发现土壤

水分的空间变异性会伴随研究区的扩大而增大;Friedl 等<sup>[16]</sup>的研究证明了土壤水分的反演效果会因像元大小的不同存在差异。甘肃省甘南藏族自治州当周草原的植被类型为亚高寒草甸,地表条件较为复杂,分辨率较高的高分影像对于复杂地表条件的研究精确度更高,能够更好地反映地表异质性,提高土壤水分反演的精度。国内学者对较常见 *TVDI*、*VSWI* 和 *ATI* 这 3 种典型土壤水分遥感反演方法在草地生态系统中的应用进行对比分析发现:*ATI* 在表层土壤水分变化大或某些植被覆盖情况下不能使用,*VSWI* 回归拟合模型相关性趋势略优于 *TVDI* 模型,其决定系数也高于 *ATI* 和 *TVDI* 模型;同时,高寒草甸植被生态系统土壤水分反演在夏季使用 *VSWI* 模型误差最小<sup>[17]</sup>。

高分二号(GF-2)遥感卫星具有亚米级、大幅宽的特点,可以满足高精度的土壤水分反演需求<sup>[18]</sup>。目前,对于青藏高原地区土壤水分的研究较多<sup>[19]</sup>。部分研究发现,土壤水分在干季主要受土壤温度的影响,在湿季则受降水的影响较多<sup>[20]</sup>;旱灾发生频繁且持续时间长、灾情重时,有研究将 *TVDI* 作为评价土壤水分的指标,并结合实测水分数据进行验证评价<sup>[21-22]</sup>。综上所述,诸多学者在区域土壤水分分布及变化特征等方面取得了成果,对于青藏高原土壤水分的研究多集中在高原中部、北部,其研究区域的广度有一定的局限性,并且对于适合在高寒植被生态系统使用的 *VSWI* 模型使用较少。选择 *VSWI* 模型对青藏高原东北缘高寒草甸生态系统进行土壤水分反演,在科学研究与生产生活方面都具有重要价值。因此,为了丰富青藏高原土壤水分反演研究成果和研究方法,本文在前人研究基础上,选择青藏高原东北缘典型亚高寒草甸区,通过 GF-2、Landsat-7 遥感影像结合来获取 *VSWI*,建立土壤水分反演模型,反演位于甘肃省甘南藏族自治州合作市的当周草原土壤水分含量,通过比较其精度,探究植被供水指数法在甘南亚高寒草甸进行土壤水分反演的适用性,同时采用半方差函数、相关性分析法分析青藏高原东北缘典型亚高寒草甸土壤水分空间变异特点,为后续青藏高原地区科学研究提供参考。

## 1 研究区概况

研究区位于甘肃省甘南藏族自治州的合作市南郊的当周草原(图 1,见 230 页),海拔为 2 940~3 120 m,区域植被类型为亚高寒草甸,气候属于高寒山地型气候,一年中冷季所占时间较长,年均降

水量 545 mm,降水集中于 7—9 月,研究区面积 465 hm<sup>2</sup>,主要存在两道沟谷,大致呈南北方向分布,北部沟谷方向为西北—东南走向,南部沟谷为南北走向,两道沟谷均为北低南高,地貌单元主要由沟与梁组成,土层总体较厚,土壤有亚高山草甸土、黄土、黑钙土、红色砂砾岩土、沼泽土等多种土壤类型。考虑到研究区内存在冻土,为减少该区域冻土对土壤水分反演效果的影响,选择高寒生态系统土壤活动层解冻的时间范围(4 月下旬~10 月中旬)内的遥感影像进行反演研究。

## 2 数据源及其预处理

### 2.1 遥感数据与 DEM 数据

DEM 数据采用 ASTER GDEM 数据源,该 DEM 数据发布时间为 2009 年 6 月,置信度达到 95%,水平分辨率与垂直分辨率分别为 30 m、20 m,数据类型为 IMG。对下载后的数据进行解压与定义投影,通过研究区矢量边界裁剪数据得到研究区数字高程数据。遥感影像信息见表 1。

表 1 遥感影像信息

Table 1 Remote sensing image information

数据源 Data origin	成像时间 Acquisition time	使用波段 Spectral band used	坐标系 Coordinate system	空间分辨率 Spatial resolution/m
GF-2	2017-07-11	红外 Infrared band	WGS-84	3.2
		近红外 Near-infrared band		
Landsat-7	2017-07-10	红外 Infrared band		30
		近红外 Near-infrared band		
		热红外 Thermal infrared band		

### 2.2 地面采样

本研究于 2017 年 7 月 10 日进行地面采样,采样时间与 GF-2 和 Landsat-7 卫星遥感数据获取时间接近,采样范围为当周草原景区,采样点共 32 个,通过南方测绘 S86T 设备记录采样点坐标,雷达数据主要反映表层土壤水分,因此利用手持土壤水分速测仪(TDR 100, Campbell Scientific, Inc, US)测定 0~10 cm 土层土壤重量含水量,用于反演模型建立与精度验证,本文反演所得土壤水分是指土壤重量含水量。在样点用已知重量、相同规格环刀采集两组 0~10 cm 土层原状土壤,采集完成后加盖密封带回实验室测定土壤饱和含水率及土壤重量含水量,对土壤水分速测仪测得的数值进行异常值剔除,最后得到 29 个样点(图 1)的土壤重量含水量。同时采样点布设以及数据获取充分考虑了以下因素:在

不同植被类型进行采样,代表整个研究区域的特征,以确保数据的可靠性;样点间隔 50~100 m 设置采样点;同时考虑不同坡位,防止采集数据相似性过高;随机选取采样点,避免因主观因素造成结果偏差;选择采样点时避开人为干扰,减少人为干扰导致的数据偏差。

## 3 研究方法

### 3.1 植被供水指数

VSWI 是通过遥感监测植被覆盖区地表温度(LST, landsat surface temperature, °C)为表征植被的冠层温度。植被缺水时会关闭气孔减少蒸腾,植被冠层温度升高,因而植被冠层温度可以监测旱情。NDVI 为监测植被生长状况的指标,植被受旱时叶片凋萎,叶面积指数下降,叶绿素色素发生变化,因而 NDVI 可监测干旱。植被供水指数将冠层温度  $T_s$  和归一化植被指数 NDVI 两种指标结合,考虑在不同供水情况下植被对红外、近红外及热红外波段的响应,表征植被生长时植被指数与冠层温度之间的联系。植被供水指数定义为:

$$VSWI = \frac{NDVI}{T_s} \quad (1)$$

式中,NDVI 表示归一化植被指数(无量纲); $T_s$  代表植被冠层温度(°C),近似看作地表温度。当供水不足时,植被因缺水关闭气孔,导致植被冠层温度升高;供水正常时,植被气孔正常开启,蒸腾作用正常,植被冠层温度稳定。由 VSWI 计算公式可知,VSWI 与土壤水分含量值为正相关关系。

本文根据遥感影像计算各样点的 NDVI 值,反演得到植被冠层温度,近似看作地表温度,通过计算得到 VSWI,将土壤水分含量实测值相对应样点与计算得到的 VSWI 值采用线性公式进行拟合,建立土壤湿水分反演模型:

$$S = a \times VSWI + b \quad (2)$$

式中, $S$  为土壤水分含量实测值(%); $a$ 、 $b$  为线性公式拟合系数。

3.1.1 地表温度反演 热红外遥感影像反演及气象站实测是地表温度获取的主要手段,遥感数据自 20 世纪 60 年代开始用于地表温度的反演,目前地表温度反演算法主要有劈窗算法、单波段算法、多角度算法等,单波段算法主要包括单窗算法、单通道算法和辐射传输方程。赵菲菲等<sup>[23]</sup>研究证明单窗算法对地表温度反演精度最高,因此选用单窗算法通过 Landsat-7 遥感影像的热红外波段进行地表温度反演,计算所用到的大气透射率等参数通过

Landsat-7 影像数据在 NASA 官网进行获取。与传统的辐射传导方程法相比, Qin 等<sup>[24]</sup>提出的单窗算法仅需要地表温度和大气水分两个大气参数,即:

$$T_s = \frac{1}{C} [a(1 - C - D) + (b(1 - C - D) + C + D) T_{\text{sensor}} - D T_a] \quad (3)$$

其中

$$C = \varepsilon \tau \quad (4)$$

$$D = (1 - \tau) [1 + (1 - \varepsilon) \tau] \quad (5)$$

$$T_a = 16.0110 + 0.92621 T_0 \quad (6)$$

式中,  $\varepsilon$  为地表比辐射率(无量纲);  $a$  和  $b$  为根据图像温度变化范围得到的常数,一般情况下(地表温度介于  $0 \sim 70^\circ\text{C}$  范围内)取  $a = -67.355$ 、 $b = 0.458$ 、 $606$ <sup>[25]</sup>;  $T_{\text{sensor}}$  为星上亮温(K);  $T_a$  为大气平均温度(K);  $T_0$  为近地表温度(K);  $\tau$  为大气透射率(无量纲)。

**3.1.2 归一化植被指数** 归一化植被指数是目前干旱监测普遍使用的方法,归一化植被指数在反映土壤水分方面较为准确,而植被的生长状况又受土壤水分因子影响极大,植被的生长状况可以间接反映出土壤的干旱情况。植物细胞内的叶绿素含量影响了植被的光谱曲线,  $NDVI$  即为根据该光谱曲线反映的植被生长发育状况的指数。因此归一化植被指数与地表植被生长状态存在密切关系,根据  $NDVI$  值可以反映植被生长状况。

GF-2 与 Landsat-7 影像数据都具有近红外波段与红外波段,对两种遥感影像分别计算其归一化植被指数。植物在近红外波段与红外波段不同的光谱特征,可以较明显地反映地物特征。 $NDVI$  值越高,表示该地区植被的覆盖度越高,植被生长状况越好<sup>[26]</sup>。

### 3.2 地形因子提取

在青藏高原中东部高寒草甸,浅层土壤水分含量受地形因子影响较为显著<sup>[27]</sup>,通过 ArcGIS 10.8 软件对研究区 DEM 数据进行处理,从中获取研究区海拔、坡度以及坡向 3 个因子(图 2A、B、C),将地形因子与反演得到的土壤水分含量值结合进行分析。对 DEM 数据进行处理后发现,研究区海拔介于 2 943 ~ 3 119 m 之间,山体坡度在  $24^\circ$  以内,总体坡度较缓。对研究区坡向按阴坡 [ $0 \sim 45^\circ$ ,  $315^\circ \sim 360^\circ$ ]、半阴坡 [ $45^\circ \sim 90^\circ$ ,  $270^\circ \sim 315^\circ$ ]、半阳坡 [ $90^\circ \sim 135^\circ$ ,  $225^\circ \sim 270^\circ$ ]、阳坡 [ $135^\circ \sim 225^\circ$ ] 4 个坡向进行划分。

### 3.3 数据分析

**3.3.1 地统计学分析** 半方差函数是地统计学的主要工具,用于研究变量在空间上的随机性和结构性分布特征,适合于集水区域土壤水分含量的空间

变异分析。通过 GS+9.0 软件对土壤水分含量进行半方差函数分析,以确定土壤水分含量的空间自相关性和空间分布模式。其计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (7)$$

式中,  $\gamma(h)$  为半方差函数;  $Z(x_i)$  为样点所对应的土壤水分含量值(%),  $Z(x_i + h)$  为  $h$  距离处的样点的土壤水分含量值(%);  $h$  为距离(m);  $N(h)$  为距离  $h$  的样点数量。依据决定系数  $R^2$  最大、残差平方和  $SSQ$  最小的原则对常用的球状模型、高斯模型、指数模型进行筛选,选择最优的半方差函数模型。

**3.3.2 经典统计分析** 本文通过 SPSS 26 平台,使用变异系数法对研究区土壤水分含量的空间分布及空间变异进行表征,并通过主成分分析法来探究影响土壤水分分布和变异的影响因素。空间变异系数  $CV$ (%) 的计算公式如下:

$$CV = \frac{STD}{Mean} \quad (8)$$

式中,  $STD$  为标准差(无量纲);  $Mean$  为土壤水分含量平均值(%).  $CV$  反映土壤水分的空间变异程度,一般认为  $CV < 10\%$  时为弱变异,  $CV > 75\%$  时高度变异,  $10\% < CV < 75\%$  之间为中等程度变异。

通过在 SPSS 平台进行相关性分析证明土壤水分空间变异与地形因子、 $NDVI$ 、地表温度间相关关系,最后通过主成分分析法对空间变异系数  $CV$  的主要影响因子进行分析。主成分分析法是将多个因子降维转化成少数指标(主成分),通过主成分揭示多个变量间内部联系,反映影响变量的信息。

主成分分析法将原始数据中的多个变量分解为几个不相关的分量,而特征向量的空间正交性是一种过强的而非期望的约束条件,结果依赖于数据覆盖的空间范围。旋转主成分分析法可以有效改进这些缺陷,并且能够突出主成分,得到一些简明且易于理解的空间模型。

## 4 结果与分析

### 4.1 土壤水分反演模型的建立与检验

**4.1.1 土壤水分反演模型的建立** 通过 ENVI 软件,对 GF-2 以及 Landsat7 遥感数据进行辐射定标、大气校正、正射校正、图像裁剪等处理,利用单窗算法与归一化植被指数法获取地表温度与归一化植被指数,进而对建模样本点处  $VSWI$  值进行计算,与建模样本点所实测得到的土壤水分含量数据进行相关性分析,并进行线性拟合构建土壤水分含量反演模型(图 3)。结果显示,计算得到的  $VSWI$  值与土

壤水分呈良好的正相关关系,即  $VSWI$  值越大,土壤水分含量值也越高。两个模型的决定系数均在0.48以上,并通过显著性检验 ( $P < 0.01$ ),说明土壤水分含量的实际情况一定程度上可以通过两种遥感数据所构建的土壤水分含量反演模型较好地反映出来。基于 GF-2 数据所构建的模型决定系数较高 ( $R^2 = 0.62$ ),说明该模型的稳定性较高,对于实际情况反映效果较好,建模效果较好,体现了植被供水指数法与高分遥感影像结合的优势。而基于

Landsat-7 数据建立的模型决定系数为 0.48,拟合效果次之。

4.1.2 反演模型精度验证与评价 基于预处理后的遥感影像,建立土壤水分反演模型,反演后分别获取 7 个验证样点处的植被供水指数并代入模型,得到样点反演预测的水分数值,将反演值与对应验证样点实测值进行对比分析,计算该模型的均方根误差  $RMSE$ 、平均绝对误差  $MAE$  以及相关系数  $R^2$ ,进行反演模型精度验证与评价(表 2)。

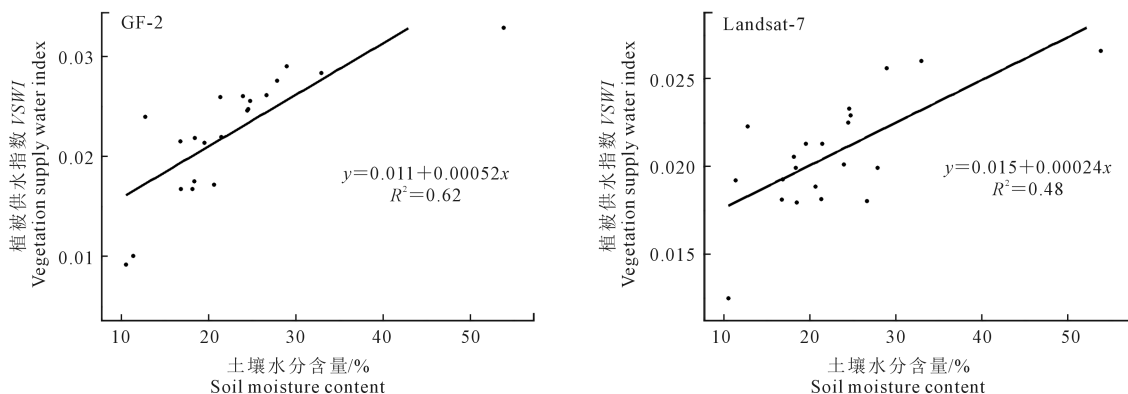


图3 土壤水分含量值与  $VSWI$  值线性拟合模型

Fig.3 Linear fitting model of soil moisture content and  $VSWI$

表2  $VSWI$  模型反演结果误差检验

Table 2 Error test of  $VSWI$  model inversion results

数据源 Data source	$RMSE/\%$	$MAE/\%$	$R^2$
GF-2	5.93	7.91	0.9641
Landsat-7	8.52	9.84	0.7352

结果表明,根据 GF-2、Landsat-7 遥感影像构建的土壤水分含量反演模型得到的土壤水分含量值与土壤水分实测值的相关系数分别为 0.9641、0.7352,均有较好的正相关关系,其中基于 GF-2 数据构建的模型的相关性更为突出。均方根误差  $RMSE$  用来衡量预测值与实测值之间的偏差, $RMSE$  越小,说明预测值与实测值之间的偏离程度越小,模型精度越高。平均绝对误差  $MAE$  用来反映预测值的偏差情况, $MAE$  越大,相对应模型预测的误差也就越大。总体来看,两个模型均方根误差与平均绝对误差都低于 10%,模型具有一定的可靠性,反演精度高。

#### 4.2 研究区土壤水分含量反演结果分析

以经过预处理的 GF-2、Landsat-7 遥感影像为基础,通过 ENVI 工具对遥感影像的  $VSWI$  进行计算,并根据上述所构建的土壤水分反演模型计算每个像元的土壤水分含量值,得到研究区土壤水分反演结果分布图(图 4A、B),Landsat-7 遥感影像的热红外波段分辨率较高,所以研究区的地表温度通过 Landsat-7 的热红外波段以单窗算法反演得到。

通过 GF-2 土壤水分反演模型的均方根误差  $RMSE$  与平均绝对误差  $MAE$  均小于 Landsat-7 土壤水分反演模型 ( $5.93\% < 8.52\%$ 、 $7.91\% < 9.84\%$ ),说明 GF-2 土壤水分反演模型反演得到的土壤水分值更接近真实值,GF-2 遥感影像土壤水分含量反演效果更好,分析基于 GF-2 图像展开。

4.2.1 土壤水分含量描述性统计特征 反演得到的研究区土壤水分含量的描述性统计特征如表 3 所示,整个研究区土壤水分含量集中介于 0.11% ~ 60.44%,从各位置土壤含水量的最大值、最小值、平均值、中位数来看,南部东坡 > 南部西坡 > 北部东坡 > 北部西坡,土壤水分含量最小值出现在研究区北部东坡,最大值出现在南部东坡,分别为 0.11%、60.44%,其中南部东坡土壤水分含量变化最大(图 5)。从变异系数  $CV$  来看,各位置土壤水分含量均属于中等变异 ( $10\% < CV < 75\%$ ),表现为北部东坡 > 北部西坡 > 南部东坡 > 南部西坡,土壤水分含量标准差在 0.08% ~ 0.09% 范围波动,偏度为 -0.38 ~ 0.17,峰度为 -0.28 ~ 0.59。实测得到的土壤水分值如表 4 所示,含水量介于 10.50% ~ 77.40%,平均值为 29.61%,标准差为 17.76%。反演所得土壤水分值范围在实测值范围内,表明本文反演所得土壤水分能够反映研究区土壤水分特征,研究方法有一定的合理性。

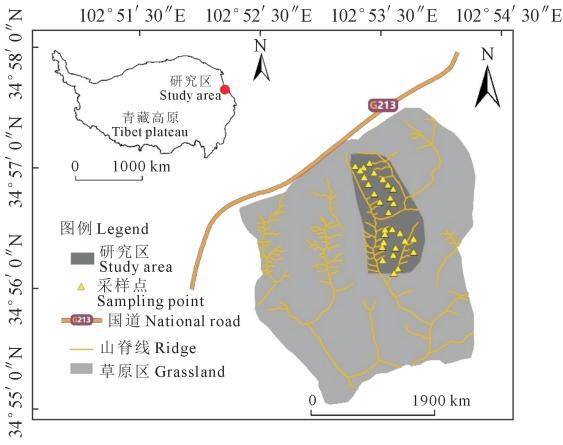


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

4.2.2 土壤水分含量空间变异结构分析 各位置土壤水分含量分布均通过 GS+9.0 的正态检验,可以利用半方差函数对土壤水分含量分布进行模型拟合。半方差函数通过计算两点间距离与两点间属性的方差来研究目标要素的空间相关性,各半方差函数理论模型的参数如表 5 所示。结果显示,基于整个研究区以及北部沟谷内地块的样点数据所拟合模型的残差  $RSS$  均较低 (2.35~3.23),而基于南部沟谷内地块的样点数据所拟合的模型残差较高,分别为 16.59 和 18.49。研究区范围内、南部东坡、南部西坡的半方差函数拟合效果较好,决定系数  $R^2$  分别为 0.72、0.92、0.83;而对北部沟谷东坡与西坡建立的半方差函数模型决定系数分别为 0.59 和 0.39,说明模型对该区域土壤水分含量解释率较

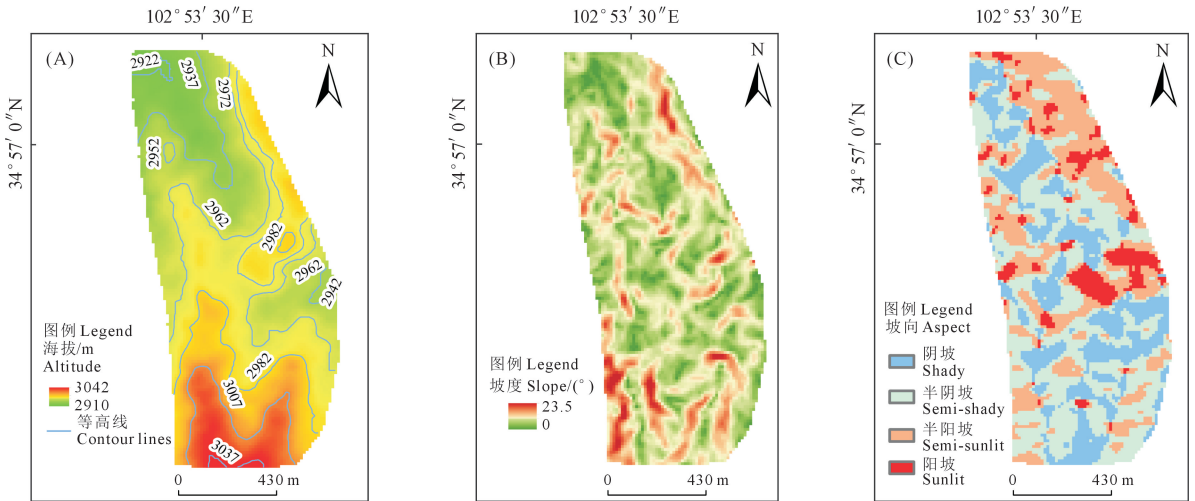


图 2 研究区地形因子

Fig.2 Topographic factors in the study area

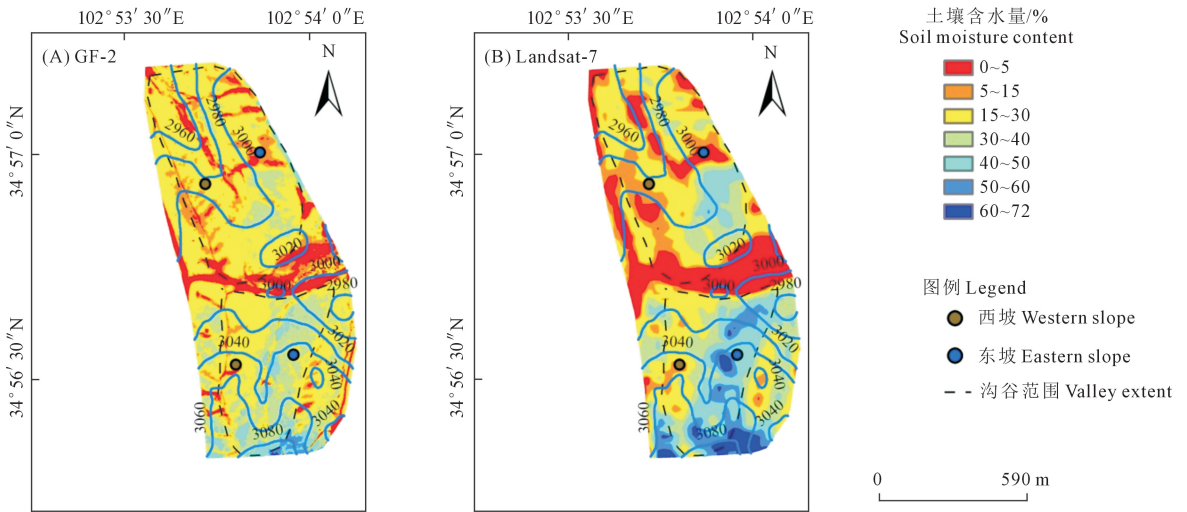


图 4 土壤水分含量反演结果分布

Fig.4 Distribution of soil moisture content inversion results

表 3 土壤水分含量描述统计特征

Table 3 Descriptive statistics of soil moisture content at different positions

位置 Position	最大值 Maximum/%	最小值 Minimum/%	平均值 Mean/%	中位数 Median/%	标准差 Standard deviation/%	CV/%	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
研究区 Study area	60.44	0.11	23.70	24.07	0.09	40.60	0.06	0.30
北部东坡 Eastern slope in the north	47.23	0.11	19.72	20.51	0.08	42.00	-0.06	0.35
北部西坡 Western slope in the north	44.62	0.87	19.65	20.27	0.08	39.40	-0.22	-0.28
南部东坡 Eastern slope in the south	60.44	0.24	28.33	28.66	0.10	34.80	0.17	0.59
南部西坡 Western slope in the south	52.25	0.25	27.29	27.73	0.09	32.00	-0.38	0.46

表 4 土壤水分含量实测值/%

Table 4 Actual measured value of soil moisture content

编号 Number	土壤水分含量 Soil moisture content	编号 Number	土壤水分含量 Soil moisture content	编号 Number	土壤水分含量 Soil moisture content
1	25.8	11	12.7	21	19.5
2	16.7	12	18.4	22	26.6
3	15.3	13	71.7	23	27.8
4	20.6	14	24.5	24	21.3
5	36.7	15	18.3	25	32.9
6	24.7	16	24.4	26	16.8
7	21.7	17	60.7	27	28.9
8	77.4	18	53.8	28	18.1
9	44.1	19	53.8	29	23.9
10	10.5	20	11.3		

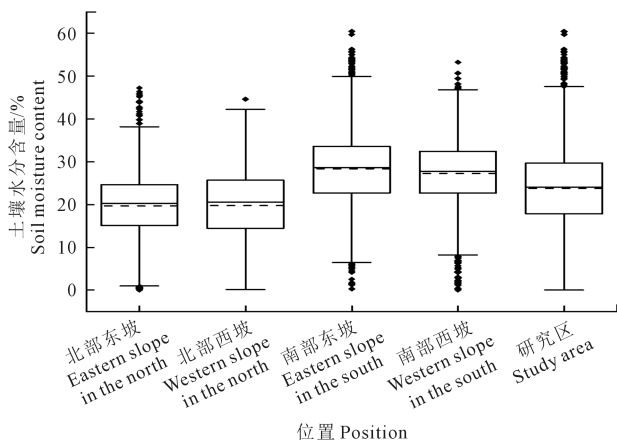


图 5 不同位置土壤水分含量分布

Fig.5 Distribution of soil moisture content in different positions

低,范围内土壤水分含量分布表现出较强的随机性。基台值( $C_0+C$ )代表变量的总变异,研究区范围内南部沟谷西坡基台值最大为  $12.82 \times 10^{-3}$ ,说明南部沟谷西坡变异程度最高。块金值( $C_0$ )代表变量在随机空间的变异程度大小,是由试验误差以及小于试验取样尺度所引起的变异,块金值较大时,说明较小范围内的某些因素不容忽视。块基比  $[(C_0)/(C_0+C)]$  用于衡量变量的空间相关性,本研究中体现土壤水分含量的空间相关性,一般认为当块基比分别为  $<25\%$ 、 $25\% \sim 75\%$ 、 $>75\%$  的情况时,分别表示土壤水分含量的空间相关性较强、中等、较弱,若块基比接近于  $100\%$ ,说明区域内土壤水分含量有较为恒定的变异。本研究区中北部沟谷东坡

表 5 土壤水分含量半方差函数模型及参数

Table 5 Semivariogram theoretical models and parameters of soil moisture content

位置 Position	模型 Model	块金值( $\times 10^3$ ) $C_0$	基台值( $\times 10^3$ ) $C_0+C$	块基比/% $C_0/(C_0+C)$	RSS	$R^2$
研究区 Study area	Exponential	1.44	9.08	84.10	2.35	0.72
北部东坡 Eastern slope in the north	Exponential	0.76	6.36	88.10	2.76	0.59
北部西坡 Western slope in the north	Exponential	1.39	7.45	81.30	3.23	0.39
南部东坡 Eastern slope in the south	Spherical	2.96	12.12	75.60	16.59	0.92
南部西坡 Western slope in the south	Spherical	5.41	12.82	57.80	18.49	0.83

块基比最大,达到了 88.10%,南部沟谷西坡块基比最小,为 57.80%;研究区各位置土壤水分含量半方差模型块基比范围均大于 50%,且整个研究区块基比为 84.10%,说明研究区土壤水分含量由随机因素主导,空间相关性较弱。

4.2.3 环境因子与土壤水分含量相关分析 本研究考虑海拔、坡度、坡向共 3 个地形因子以及 *NDVI* 和地表温度,研究区土壤水分分布与地形因子、*NDVI* 和地表温度间的相关性如表 6 所示。土壤水分分布与地形因子、*NDVI* 和地表温度的相关性虽均呈现正相关,但与坡向以及地表温度间的相关性不显著,说明研究区内土壤水分分布与坡向和地表温度关系不大,而海拔、坡度、*NDVI* 与土壤水分分布均显著相关,相关系数分别为 0.515、0.106、0.521 ( $P < 0.01$ )。

表 6 土壤水分含量和环境因子间的相关性分析

Table 6 Correlation analysis of soil moisture content and environmental factors

地形因子 Terrain factor	Pearson 相关性 Pearson's relevance	显著性(双侧) Significance(bilayeral)
海拔 Altitude	0.515**	0.000
坡向 Aspect	0.009	0.009
坡度 Slope	0.106**	0.000
<i>NDVI</i>	0.521**	0.000
地表温度 Land surface temperature	0.013	0.643

注: \*\* 表示置信度(双侧)小于 0.01 时显著相关。

Note: \*\* mean significantly correlated at 0.01 levels (bilateral).

3 种地形因素下土壤水分含量、标准差(*STD*)和变异系数(*CV*)如表 7 所示。分别考虑坡度  $<7^\circ$ 、 $7^\circ \sim 14^\circ$ 、和  $>14^\circ$  三种坡度情况,坡度  $>14^\circ$  地区土壤水分含量最高,为 32.2%;随坡度增加,土壤水分值先下降后上升,但变异系数 *CV* 却呈现出相反的趋势,坡度  $7^\circ \sim 14^\circ$  地区土壤水分变异趋势最大达到了 37.6%。不同坡向地区的土壤水分条件也不同,阴坡、半阴坡、半阳坡、阳坡之间土壤水分含量差距不大,介于 28.2%~29.1%之间,阳坡方向土壤水分变异系数最小(26.7%),阴坡土壤水分变异系数最大(38.9%),随光照条件变好,坡向间变异系数总体呈现为自阴坡向阳坡降低。在海拔因素上,土壤水分值呈现出随海拔增加而上升的趋势,不同海拔梯度间土壤水分差异较大,3 050 m 以上区域土壤水分达到了 33.2%,与低海拔区域土壤水分值差异达到了 13.7%,海拔越高的地区空间变异程度越低,3 050 m 以上区域变异系数仅为 30.2%。

4.2.4 土壤水分空间变异主控因子分析 本研究主要考虑海拔、坡度、坡向、*NDVI*(植被)和地表温度等环境因子,并运用主成分分析法来确定影响研究区土壤水分分布和空间变异的主控因子。首先对海拔、坡度、坡向、*NDVI* 和地表温度等 5 个环境因子进行 *KMO* 检测、计算结果为该 5 个环境因子 *KMO* 均值为 0.613,大于 0.50,适合运用主成分分析法进行分析。

基于 SPSS 平台对研究区土壤水分与环境因子进行主成分分析。研究区主成分分析结果如表 8 所

表 7 不同坡度、坡向、海拔的土壤水分和空间变异

Table 7 Soil moisture and spatial variability at different slope, aspect and altitude

指标 Indicator	坡度 Slope			坡向 Aspect				海拔 Altitude		
	$<7^\circ$	$7 \sim 14^\circ$	$>14^\circ$	阴坡 Shady	半阴坡 Semi-shady	半阳坡 Semi-sunlit	阳坡 Sunlit	2950~ 3000 m	3000~ 3050 m	3050~ 3100 m
平均值/% Mean value	28.400	27.900	32.200	28.700	29.100	28.200	28.600	19.500	25.800	33.200
<i>STD</i>	0.105	0.105	0.111	0.112	0.107	0.108	0.076	0.070	0.095	0.100
<i>CV</i> /%	36.900	37.600	34.300	38.900	36.700	38.500	26.700	35.600	36.800	30.200

表 8 主成分贡献率和累计方差贡献率

Table 8 Contribution rate of principal component and cumulative variance contribution rate

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue			提取平方和载入 Extractions of squared loadings		
	合计 Total	方差 Variance	累计方差贡献率/% Cumulative variance rate	合计 Total	方差 Variance	累计方差贡献率/% Cumulative variance rate
1	1.33	26.64	26.64	1.33	26.64	26.64
2	1.04	20.84	47.47	1.04	20.84	47.47
3	0.98	19.64	67.12			
4	0.96	19.28	86.40			
5	0.68	13.60	100.00			



示,主成分1中植被以及海拔因素和主成分2中地形因素中的坡度、坡向的累积贡献率达到了47.47%,即这两个主成分代表了NDVI、海拔、坡度、坡向等环境因子的47.47%。因而可以将影响研究区土壤水分分布的因子概括为两个主成分进行下一步分析。

主成分与变量之间的相关性如表9所示,荷载体量表示主成分与对应变量之间相关系数。通过相关系数可以看出主成分1与NDVI和海拔因子的相关性较高,相关系数分别为0.799和0.787;主成分2与地形因子相关性最高,与坡向的相关性达到了0.704,与坡度的相关性为-0.696。结合主成分1和主成分2的贡献率,以5个环境因子在主成分中所占比重来确定环境因子对土壤水分分布的影响大小,表现为NDVI>海拔>坡向>坡度>地表温度。

表9 初始因子载荷矩阵

Table 9 Initial factor loading matrix

变量 Variable	主成分1 Principal component 1	主成分2 Principal component 2
地表温度 Land surface temperature	0.231	0.249
海拔 Altitude	0.787	0.001
坡度 Slope	0.121	-0.696
坡向 Aspect	0.074	0.704
NDVI	0.799	-0.016

## 5 结论与讨论

### 5.1 结论

1) 研究区土壤水分含量主要介于0.11%~60.44%之间,平均值为23.70%,南部土壤水分含量较高,较为湿润;北部沟谷范围内地块土壤水分含量变异大于南部沟谷范围内地块;土壤水分含量分布状态呈现出一定程度的空间变异,体现在整个研究区内以及各个地块之间;土壤水分含量分布与坡度、海拔、坡向、NDVI、地表温度均呈正相关关系,主要受到NDVI、坡向、坡度、海拔的影响。

2) 通过高分遥感影像和植被供水指数(VSWI)来监测夏季当周草原土壤水分具有较高的可行性。两种遥感影像所建模型中土壤水分与植被供水指数(VSWI)线性关系显著,可靠度较高,反演效果较好。GF-2反演模型的拟合度最优,建模效果最好,对土壤水分含量的预测能力较好,反演得到的土壤水分含量分布图较好地反映了研究区土壤水分空间分异特征,总体上比Landsat-7影像更有优势。

### 5.2 讨论

植被供水指数法在夏季使用的误差较小,其对

土壤水分的监测适合在植被高覆盖状况下使用,如对于草原生态系统的水分反演。通过遥感反演得到的研究区土壤相对湿度值对于地表湿度整体情况的反映良好。

研究发现,地形因子与植被是研究土壤水分特征不可忽略的因素。本研究区南部沟谷与北部沟谷之间土壤水分含量存在明显差异。南部沟谷位置土壤含水量大致表现为随坡位由上至下逐渐增加,这与莫保儒等<sup>[28]</sup>研究结果一致。研究区北部沟谷部分位置土壤水分含量则呈现出由上至下降低的趋势,这与黄奕龙等<sup>[29]</sup>研究结果较为一致,表明北部沟谷的环境因子可能导致了特殊的水分分布格局。

王彦辉<sup>[30]</sup>研究表明,坡度、坡位等地形条件和研究区小气候条件影响下的蒸发力对土壤上层(<20 cm)水分有较大影响。姚雪玲等<sup>[31]</sup>研究表明,土壤水分空间差异(<20 cm)受小气候和研究区地形影响较小,而植被导致的土壤水分空间差异(>20 cm)较为明显。理论上,高度更低的下坡位土壤水分应该高于上坡位,因为降水到达地表后,通过壤中流和地表径流在重力作用的影响下流向下坡位,坡顶的水分主要来源于大气降水,较为单一,且坡顶位置风速大、太阳辐射强,坡顶蒸发、蒸腾的土壤水分比其它坡面景观位置丧失的多,而坡面的其它坡位由于水分再分配,土壤水分来源除了大气降水,还有更高坡位土壤水分的输入,因此其它坡面位置土壤含水量均大于坡顶。但这种规律会受到植被对土壤水分吸收差异的干扰。有研究发现,植被覆盖趋同时会使土壤水分逐渐同质化,导致立地类型对土壤水分的影响减弱<sup>[32]</sup>;本研究区内呈现的不同植被覆盖情况,充分反映了土壤水分的该特点。

徐学选等<sup>[33]</sup>研究发现,坡面为同种植被类型的地区,在1 m深的土层内,土壤含水量也并非表现出上坡位小于下坡位。下坡位由于地势低,虽更易得到水分补充,但由于水分与温度等环境因素较适宜,植被也更为茂密,水分消耗更多使得土壤含水量与上坡位没有明显差别甚至低于上坡位。在本研究区中,沟谷底部虽然处于下坡位,更易获得水分,但底部植被更为茂密,生长需水量更大,因此表现出上坡位土壤水分含量优于下坡位的状况,亦不排除小气候决定的降水与蒸发的原因。

由于阳坡太阳辐射强,土壤水分蒸发旺盛,同时土壤较为坚实、孔隙度小,降水易通过地表径流流失,其土壤水分小于阴坡<sup>[34]</sup>。本研究区阴坡、阳坡土壤水分的特性充分体现了该规律。对于北部

沟谷东坡(半阳坡  $90^\circ \sim 135^\circ$ ,  $225^\circ \sim 270^\circ$ ) 土壤水分含量高于西坡(阴坡  $0^\circ \sim 45^\circ$ ,  $315^\circ \sim 360^\circ$ ) 的状态,虽然北部沟谷东坡坡度大于西坡,地表径流条件优于西坡,但由于东坡植被多以金露梅灌丛为主,植被生长旺盛,荫蔽性好,因此,植被状态成为土壤水分的主控因子。

土壤水分含量的分布受到多种因素的影响,在不同的研究区域影响因素也各不相同。柳领君等<sup>[35]</sup>研究指出,在高寒草甸地区,影响土壤水分空间异质性的主要影响因子为微地形。王军德等<sup>[27]</sup>研究表明,高寒草甸土壤水分影响因素主要为坡位、草地类型、海拔、植被、风速和坡向因子。本文分析了以当周草原为例的青藏高原东北缘典型亚高寒草甸的土壤水分含量及其空间变异情况,发现 *NDVI*、海拔、坡向、坡度与土壤水分含量及其分布关系较为密切,后续应增加土壤质地、放牧活动等因素对土壤水分的影响研究,增加对土壤水分在季节间变化的关注。

对研究区土壤水分进行反演监测具有一定的延后性,为提高土壤水分反演的时效性,应在后续研究中考虑土壤水分数据实测时间与遥感影像成像时间之间的时间差;土壤水分反演的准确度还会受到地形地貌和植被覆盖度的影响,应根据不同的研究区属性、植被覆盖度对研究区划分反演分区进行分类,选择合适的植被指数,构建不同的反演分区所适合的反演模型,提高通过遥感反演监测土壤水分的可行性和准确性。

#### 参考文献:

- [1] 陈宁, 张扬建, 朱军涛, 等. 高寒草甸退化过程中群落生产力和物种多样性的非线性响应机制研究[J]. 植物生态学报, 2018, 42(1): 50-65.  
CHEN N, ZHANG Y J, ZHU J T, et al. Nonlinear responses of productivity and diversity of alpine meadow communities to degradation [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(1): 50-65.
- [2] 贾小旭. 典型黄土区土壤水分布及其对草地生态系统碳过程的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.  
JIA X X. Distribution of soil water and its effect on carbon process in grassland ecosystems on the typical loess plateau [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.
- [3] 董世魁, 汤琳, 张相锋, 等. 高寒草地植物物种多样性与功能多样性的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1472-1483.  
DONG S K, TANG L, ZHANG X F, et al. Relationship between plant species diversity and functional diversity in alpine grasslands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(5): 1472-1483.
- [4] XI C, SHI P L, SONG M H, et al. The relative controls of temperature and soil moisture on the start of carbon flux phenology and net ecosystem production in two alpine meadows on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Plant Ecology, 2020, 13(2): 247-255.
- [5] HAO X M, ZHANG J J, FAN X, et al. Quantifying soil moisture impacts on water use efficiency in terrestrial ecosystems of China[J]. Remote Sensing, 2021, 13(21): 4257.
- [6] 王林, 王磊, 李哲, 等. 青藏高原春季土壤湿度对长江中下游地区初夏短期气候影响的数值模拟[J]. 成都信息工程大学学报, 2017, 32(2): 184-191.  
WANG L, WANG L, LI Z, et al. An numerical simulation on the effect of spring soil moisture in Tibetan Plateau on early summer short-term climate over middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2017, 32(2): 184-191.
- [7] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2007, 26(1): 100-107.  
QIU Y, FU B J, WANG J, et al. Spatiotemporal variation of soil moisture and its relation to environmental factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(1): 100-107.
- [8] MEI X M, ZHU Q K, MA L, et al. The spatial variability of soil water storage and its controlling factors during dry and wet periods on loess hillslopes[J]. Catena, 2018, 162: 333-344.
- [9] JARED K E, ROBOCK A, KONSTANTIN Y V, et al. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2000, 105(D9): 11865-11877.
- [10] PRICE J C. On the analysis of thermal infrared imagery: The limited utility of apparent thermal inertia [J]. Remote Sensing of Environment, 1985, 18(1): 59-73.
- [11] NEMANI R R, RUNNING S W. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from *NDVI* and thermal-IR *AVHRR* data [J]. Journal Applied Meteorology, 1989, 28(4): 276-284.
- [12] KOGAN F N. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA Polar-Orbiting satellite data[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1995, 76(5): 655-668.
- [13] SON N T, CHEN C F, CHEN C R, et al. Monitoring agricultural drought in the Lower Mekong Basin using *MODIS NDVI* and land surface temperature data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 18(1): 417-427.
- [14] MENG L, LI J, CHEN Z, et al. The calculation of *TVDI* based on the composite time of pixel and drought analysis[J]. The International Archives of the Photogrammetry, 2011, 38: 518-524.
- [15] 李亮亮, 依艳丽, 凌国鑫, 等. 地统计学在土壤空间变异研究中的应用[J]. 土壤通报, 2005, 36(2): 265-268.  
LI L L, YI Y L, LING G X, et al. Utilization of geostatistics in soil spatial variability[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(2): 265-268.
- [16] FRIEDL M A, DAVIS F W, MICHAELSEN J, et al. Scaling and uncertainty in the relationship between the *NDVI* and land surface biophysical variables: An analysis using a scene simulation model and data from *Fife* [J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 54(3): 233-246.
- [17] 孔婕, 李纯斌, 吴静. 草地土壤水分遥感反演方法的适用性[J]. 草业科学, 2020, 37(12): 2463-2474.  
KONG J, LI C B, WU J. Applicability of remote sensing inversion

- models for estimating regional soil moisture in Chinese grasslands[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(12): 2463-2474.
- [18] 潘腾. 高分二号卫星的技术特点[J]. *中国航天*, 2015, (1): 3-9.  
PAN T. Technical characteristics of the GF-2 satellite[J]. *Aerospace China*, 2015, (1): 3-9.
- [19] 王兮之, 杜国桢, 梁天刚, 等. 基于RS和GIS的甘南草地生产力估测模型构建及其降水量空间分布模式的确立[J]. *草业学报*, 2001, 10(2): 95-102.  
WANG X Z, DU G Z, LIANG T G, et al. The establishment of grassland productive assessment model and the determination of precipitation resource distribution pattern of Gannan Tibetan autonomous prefecture based on RS and GIS[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2001, 10(2): 95-102.
- [20] 万国宁, 杨梅学, 王学佳, 等. 青藏高原中部BJ站土壤湿度不同时间尺度的变化[J]. *土壤通报*, 2012, 43(2): 286-293.  
WAN G N, YANG M X, WANG X J, et al. Variations in soil moisture at different time scales of BJ site on the Central Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(2): 286-293.
- [21] 李忆平, 王劲松, 李耀辉, 等. 中国区域干旱的持续性特征研究[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(5): 1131-1142.  
LI Y P, WANG J S, LI Y H, et al. Study of the sustainability of droughts in China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(5): 1131-1142.
- [22] 宋春桥, 游松财, 柯灵红, 等. 藏北高原土壤湿度MODIS遥感监测研究[J]. *土壤通报*, 2012, 43(2): 294-300.  
SONG C Q, YOU S C, KE L H, et al. The study of MODIS remote sensing for monitoring soil moisture over Northern Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(2): 294-300.
- [23] 赵菲菲, 包妮沙, 吴立新, 等. 国产HJ-1B卫星数据的地表温度及湿度反演方法——以呼伦贝尔草原伊敏露天煤矿区为例[J]. *国土资源遥感*, 2017, 29(3): 1-9.  
ZHAO F F, BAO N S, WU L X, et al. Retrieving land surface temperature and soil moisture from HJ-1B data: A case study of Yimin open-cast coal mine region in Hulunbeier grassland[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2017, 29(3): 1-9.
- [24] QIN Z, KARNIELI A, BERLINER P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(18): 3719-3746.
- [25] 覃志豪, LI W J, ZHANG M H, et al. 单窗算法的大气参数估计方法[J]. *国土资源遥感*, 2003, (2): 37-43.  
QIN Z H, LI W J, ZHANG M H, et al. Estimating of the essential atmospheric parameters of Mono-Window Algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat TM6[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2003, (2): 37-43.
- [26] DEERING D W. Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors [D]. Texas; Texas A&M University, 1978.
- [27] 王军德, 王根绪, 陈玲. 高寒草甸土壤水分的影响因子及其空间变异研究[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(3): 428-433.  
WANG J D, WANG G X, CHEN L. Impact factors to soil moisture of alpine meadow and their spatial heterogeneity [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(3): 428-433.
- [28] 莫保儒, 王子婷, 蔡国军, 等. 半干旱黄土区成熟柠条林地剖面土壤水分环境及影响因子研究[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(6): 1207-1215.  
MO B R, WANG Z T, CAI G J, et al. Soil water environment in different soil layers and influence factors of mature forest of *Caragana korshinskii* in semiarid Loess Area[J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(6): 1207-1215.
- [29] 黄奕龙, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵小流域地形和土地利用对土壤水分时空格局的影响[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(3): 334-342.  
HUANG Y L, CHEN L D, FU B J, et al. The influence of topography land use on soil moisture spatial-temporal pattern in the hilly area of Loess Plateau[J]. *Quaternary Science*, 2003, 23(3): 334-342.
- [30] 王彦辉. 在不同植被类型条件下陇东地区雨季土壤水分的消退规律[J]. *水土保持学报*, 1989, (2): 81-89.  
WANG Y H. A study on the depletion rule of soil water in rainy season[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1989, (2): 81-89.
- [31] 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, LY 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.
- [32] CANTÓN Y, SOLÉ-BENET A, DOMINGO F. Temporal and spatial patterns of soil moisture in semiarid Badlands of SE Spain [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 285(1/4): 199-214.
- [33] 徐学选, 刘文兆, 高鹏, 等. 黄土丘陵区土壤水分空间分布差异性探讨[J]. *生态环境*, 2003, 12(1): 52-55.  
XU X X, LIU W Z, GAO P, et al. The discussion on soil moisture distributional diversity in hilly Loess Plateau region[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2003, 12(1): 52-55.
- [34] 牛钰杰, 周建伟, 杨思维, 等. 坡向和海拔对高寒草甸山体土壤水热和植物分布格局的定量分解[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(5): 1489-1497.  
NIU Y J, ZHOU J W, YANG S W, et al. Quantitative apportionment of slope aspect and temperature and plant distribution on alpine meadow[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(5): 1489-1497.
- [35] 柳颖君, 张宏, 罗岚. 青藏高原东缘高寒地区土壤水分的空间异质性[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2008, 54(4): 414-420.  
LIU L J, ZHANG H, LUO L. Spatial heterogeneity of soil water of alpine area in eastern Qinghai-Tibet plateau[J]. *Journal of Wuhan University(Natural Science Edition)*, 2008, 54(4): 414-420.