网络首发时间：2020-10-29 11:56:15
网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20201029.1125.032.html

DOI: 10.5846/stxb202005011079
杨志辉,赵军,朱国锋,刘家良,郭文镏,黄治化,王炎强.顾及植被覆盖影响的石羊河流域土壤水分遥感估算及空间格局分析.生态学报,2020,40(23)
Yang Z H,Zhao J,Zhu G F,Liu J L,Guo W B,Huang Z H, Wang Y Q.The remote sensing estimation and spatial pattern analysis of soil moisture in the Shiyang River Basin in consideration of vegetation cover affect.Acta Ecologica Sinica,2020,40(23)

顾及植被覆盖影响的石羊河流域土壤水分遥感估算及空间格局分析

杨志辉[1],赵 军[1,*],朱国锋[1,2],刘家良[1],郭文镏[1],黄治化[1],王炎强[1]
1 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070
2 中国科学院西北生态环境资源研究院,冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000

摘要:土壤水分是地表和大气循环的纽带,对植被生长和高效农业灌溉起着关键作用。以石羊河流域为研究区,采用植被覆盖度/表面反照率梯形特征空间散点图计算裸土反照率,减少植被对遥感获取土壤水分误差,以提高遥感土壤水分估算精度。同时通过稳定性、空间自相关和地理探测器等分析了 SM 的空间格局及其影响因素。结果表明:(1)裸土反照率模型在石羊河流域的 SM 反演精度较高,为流域尺度的 SM 计算提供了新的方法思考。(2)SM 具有明显的空间自相关性,Moran's 值为 0.88(Z-score=1852.94,P <0.01),上游林地高-高聚集,下游荒漠低-低聚集,且 SM 与 FVC 显著相关(P <0.01)。(3)石羊河流域年内 SM 稳定性整体良好,其中稳定性好和较好区域占研究区 88.34%。(4)SM 空间分布受多因子影响,各因子解释能力存在显著差异,其中植被覆盖度>土壤类型>高程>土地利用,且因子间交互作用增强了对 SM 空间分异的解释力。(5)不同土地利用类型的 SM 差异较大,其中未利用地大部分 SM 小于 7%;草地和耕地 SM 居于中等水平,SM 值为 7%—15%;林地水平最高,SM 值大于 25%。

关键词:地理探测器;石羊河流域;土壤水分;梯形特征空间;空间自相关

The remote sensing estimation and spatial pattern analysis of soil moisture in the Shiyang River Basin in consideration of vegetation cover affect

YANG Zhihui[1],ZHAO Jun[1,*],ZHU Guofeng[1,2],LIU Jialiang[1],GUO Wenbo[1],HUANG Zhihua[1] WANG Yanqiang[1]
1 *College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou, 730070, China*
2 *State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000, China*

Abstract: Soil moisture is the link between the surface and atmospheric circulation. It is an important part of hydrological cycle and water-heat balance. And it plays a key role in vegetation growth and efficiently agricultural irrigation. Therefore, accurate and fast soil moisture remote sensing inversion results are importantly basic data for agricultural production and ecological environment protection. The MODIS-MYD09A1 data with a spatial resolution of 500 meters and a temporal resolution of 8 days was used to calculate the surface albedo. The MODIS -MYD13A1 NDVI product data with a spatial resolution of 250 meters and a temporal resolution of 16 days was used to calculate vegetation coverage. In order to improve the estimation accuracy of the remote sensing soil moisture in the Shiyang River Basin, bare soil albedo was calculated by using vegetation coverage and surface albedo trapezoidal characteristics space scatter plot, this is to reduce the error of vegetation on soil moisture in remote sensing. The measured data was used to evaluate the accuracy of the inversion model.

基金项目:国家自然科学基金项目(41661084,41867030)
收稿日期:2020-05-01; **网络出版日期**:
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhaojun@nwnu.edu.cn

The inversion results of the bare soil albedo model were used to grade and map. At the same time, the spatial pattern of SM and its influencing factors were analyzed through stability analysis, spatial autocorrelation analysis and geographic detectors. The results show that: (1) The bare soil albedo model could yield more accurate soil moisture inversion accuracy in the Shiyang River Basin, which provided a new method for the SM calculation at the watershed scale. (2) Soil moisture had obviously spatial autocorrelation, Moran's value was 0.88 (Z-score = 1852.94, P <0.01). Forest land in the upstream was high-high aggregation. Desert in the downstream was low-low aggregation. Soil moisture was significantly correlated with fractional vegetation coverage (P <0.01). (3) The annual overall stability of the soil moisture in the Shiyang River Basin being good, good stability and better stability area accounted for 88.34% of the study area. (4) The spatial distribution of soil moisture was affected by multifactor. And the explanatory ability of each factor was significantly different. Among these factors, vegetation coverage had the best interpretive ability. Soil type was in the second place. Elevation was in the third place and land use was at the end. The interaction between factors enhanced the explanatory ability of the spatial differentiation of soil moisture. (5) The soil moisture of different land use types was quite different. Among them, the soil moisture of most unused land was less than 7%; the soil moisture of grassland and cultivated land was at medium level, with soil moisture value of 7%—15%; the soil moisture level of woodland was the highest, and soil moisture value more than 25%.

Key Words: geodetector; Shiyang River Basin; soil moisture; trapezoid feature space; spatial autocorrelation

土壤水分(SM,soil moisture)是陆气系统中的变量[1-2],是水文循环和水热平衡的组成部分[3],对地表植被生长也至关重要[4]。此外,SM 对地表大气温度的演变[5]、降水的形成[6]和碳循环[7]有重要影响,对干旱事件的形成和发展也有重要的驱动作用[8]。因此土壤水分在气候、水文、生态和农业研究中起着重要的作用。

遥感技术的发展为大范围、及时、准确的 SM 遥感监测提供了可能[9],成为检测和监测 SM 的主要手段[10]。早期 SM 光学遥感估算方法主要有光谱反射率法、短波红外水分胁迫指数、植被状况指数和温度植被干燥指数等[11-13]。这些方法在估算 SM 时取得了较好的效果,但由于地表条件的差异,应用于不同研究区也存在一定的差异。表观热惯量法适用于裸露土壤,温度/植被指数法适用于植被覆盖度较大区域[14],但由于不同植被覆盖率的影响,降低了 SM 的估算精度。因此探索遥感估算 SM 的方法必须通过消除植被覆盖影响来实现。消除混合像素中植被反射率贡献的方法主要有:光谱混合分析法、光学植被覆盖度法和梯形特征空间法[15]。但在实际应用中光谱混合分析和光学植被覆盖度法计算处理复杂,估算条件较难满足。而梯形特征空间散点图是由地表温度/植被指数或反照率/植被覆盖度的散点图形成,对 SM 较为敏感且不依赖于地面观测数据,并可以与其他模型组合,所以梯形特征空间被广泛应用于估计植被蒸腾作用、土壤蒸发和土壤含水量[16]。

石羊河流域生态问题受广大学者关注[17]。该流域农业用水量比重较高,土壤水分的准确估算对农业灌溉用水的精确计算至关重要[18],因此,提高 SM 的估算精度、分析 SM 的空间格局是该流域目前亟待解决的问题之一。基于此本文引入散点图梯形特征空间来消除植被的影响,提高 SM 估算精度,进而分析空间格局,为土壤水分的有效利用提供依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

石羊河流域位于甘肃河西走廊东部,祁连山北麓,介于 101°22′—104°16′E,36°29′—39°27′N[19],属河西走廊三大内陆河流域之一,总面积 4.16 万 km^2(图 1)。流域太阳辐射强,温差大,降水少,年降水量自南至北约为 700~50mm、潜在蒸发量约为 1200~2600mm,属于典型的大陆温带干旱气候,且气候特征具明显垂直分异。上游祁连山高寒半干旱湿润区,植被以高山和亚高山草甸为主,水土保持能力较强;中游走廊平原干旱

区,是重要的灌溉农业区;下游温暖干旱区,主要为民勤绿洲和荒漠[20]。

1.2　研究数据

本文采用空间分辨率 500m,时间分辨率 8d 的 MODIS-MYD09A1 数据的 1—7 波段计算地表反照率,从 2018 年 11 月至 2019 年 10 月共 46 期数据,该数据能够满足生产活动对土壤湿度数据快速获取和及时更新的要求。由空间分辨率为 250m,时间分辨率为 16d 的 MODIS-MYD13A1 NDVI 产品数据计算植被覆盖度(fractional vegetation cover,FVC),从 2018 年 11 月至 2019 年 10 月共 24 期。上述数据来源于 NASA(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/)。

土地利用数据和土壤类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)。

笔者团队在 2019 年 8 月下旬用土钻对石羊河流域 0—10cm 地表进行土壤采样,用手持 GPS 记录样点位置,样点分布如图 1 所示。将土壤样本装入铝盒中并现场称重,带回实验室放入 105℃的烤箱中持续烘烤 8h,然后将其放置在干燥器中冷却和称重,持续操作至两者差小于 3mg,最后计算实际土壤含水量。实测 SM 数据用于构建土壤水分估算模型和精度验证。

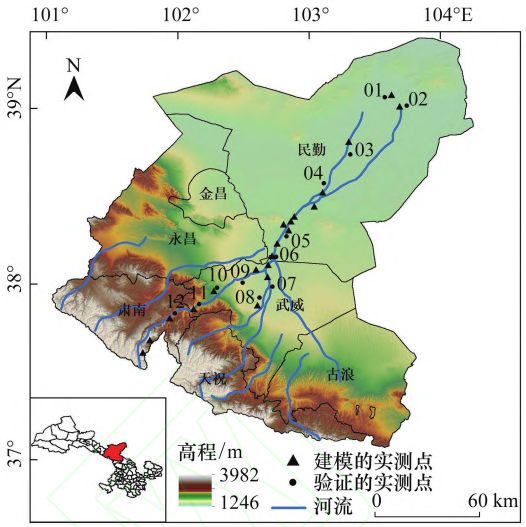

图 1　研究区位置概况

Fig.1　Location of the study area

1.3　研究方法

1.3.1　地表反照率

采用 Liang Shunlin 在 2001 年提出的 MODIS 表面反照率模型来计算地表反照率[21],该模型在反演华北土壤水分时也得到了充分应用[22],公式如下:

$$a = 0.16\rho 1 + 0.29\rho 2 + 0.243\rho 3 + 0.116\rho 4 + 0.112\rho 5 + 0.08\rho 7 - 0.0015 \quad (1)$$

式中:a 为全波段反照率,$\rho_1 \sim \rho_5$、ρ_7分别为 MODIS 相应波段的地物反射率。

1.3.2　建立梯形特征空间

梯形由 a_{sd},a_{vd},a_{vw}和 a_{sw}四个点形成(图 2)。其中 a_{sd}和 a_{sw}表示植被覆盖率为零的最大和最小地表反照率。点 a_{vd}和点 a_{vw}表示植被覆盖率为 100%时最大和最小地表反照率。其中上边界称为“理论干燥边”,表示在给定的植被覆盖条件下土壤是非常干燥的。但在实际应用中,“理论干燥边”通常无法准确获得,取而代之的是“实际干边”,表示植被覆盖率变化时的实际表面反照率。“理论湿边”表示在一定植被覆盖条件下土壤水分是充足的。同样,在实际应用中使用“实际湿边”。位于“理论干边”和“理论湿边”之间的 SM 等值线便可以通过线性插值计算[23]。在 SM 等值线的基础上可以容易计算裸土反照率。本文根据像元二分模型和归一化植被指数计算研究区植被覆盖度[24]。

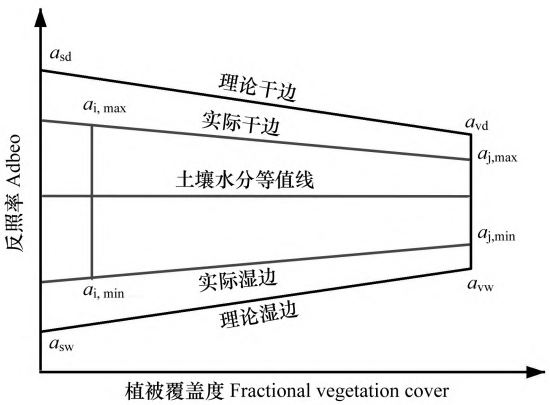

图 2　表面反照率/植被覆盖梯形特征空间示意图

Fig. 2　Trapezoid space schematic diagram of surface albedo/ vegetation coverage

1.3.3　裸土反照率计算

研究区地表反照率主要取决于当地植被和土壤特征。因此,反照率是土壤和植被的加权总和[25],结合梯

形特征空间得到裸土反照率计算公式,计算步骤详见文献[26]。

$$a_{soil} = a - FVC\left[\frac{a - a_{i,min}}{a_{i,max} - a_{i,min}}(k_d - k_w) + k_w\right] \quad (2)$$

式中:a_{soil}代表裸土反照率,a 代表地表反照率。FVC 表示植被覆盖度。k_d和 k_w分别表示“实际干边”和“实际湿边”的斜率。$a_{i,max}$和 $a_{i,min}$表示植被覆盖度较低时的实际地面最大和最小反照率。

1.3.4 模型精度评估

计算 SM 估算值与实测土壤水分值的拟合度(R^2),均方根误差(RMSE)、平均绝对百分比误差(MAPE)、不等式系数(TIC)、绝对误差(AE)和相对误差(RE)来评估土壤水分估算模型精度。此外,通过逐像元计算植被覆盖度和土壤水分的 Pearson′s 相关系数来评估植被覆盖对土壤水分空间分布的影响[27]。

1.3.5 稳定性计算

标准差是衡量数据分布程度的方法,可用于评估时间序列上 *SM* 的稳定性[28]。公式如下:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(SM_i - \overline{SM})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

式中:*SD* 是标准差,SM_i表示第 i 期土壤水分数据,$\overline{SM}$ 是 2019 年 *SM* 均值,n 代表时间。*SD* 值越小,数据分布越集中,稳定性越好。将 *SD* 分为五类:差(*SD*> 0.2),较差(0.13 <*SD* <0.2),稳定(0.08 <*SD* <0.13),较好(0.03 <*SD* <0.0.08)和好(*SD* <0.03)。

1.3.6 空间自相关

为分析整体尺度上 SM 在地理空间上是否存在集聚特征,采用全局 Moran′s I (式(4))评估 SM 在空间上的自相关性。同时用局部空间相关 Moran′s I(式(5))系数进一步量化空间要素与周围要素之间的差异程度及空间分布特征[29-30]。

$$I_{Global} = \frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij})\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

$$I_{Local} = \frac{n(x_i - \bar{x})\sum_{j=1}^{n}w_{ij}(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

式中:n 为空间数据的个数;x_i和 x_j分别为 i 区、j 区的 SM 值;$\bar{x}$ 为所有空间数据的平均值;w_{ij}为空间权重矩阵,空间权重矩阵一般为距离矩阵。

1.3.7 地理探测器模型

地理探测器主要包含以下 4 种:因子探测,探测每个影响因子对 SM 空间分异的影响大小,q 值越高则对 SM 的影响力越大。风险探测,探测因子对 SM 是否具有风险性,指示因子在不同等级内对 SM 分布的影响。交互作用探测,用于判断不同影响因子对 SM 的交互作用。生态探测,用于比较两因子对 SM 空间分布的影响是否有显著差异。分析过程详见文献[31]。q 值是衡量一个因子对因变量的解释力,表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (6)$$

式中:h 为 SM 值影响因子的分类或分区,N_h和 N 分别为 h 层和全区的单元数,σ_h^2和σ^2分别是 h 层和全区 SM 值的方差,SSW 和 SST 分别为层内方差之和及全区总方差,q 的值域为[0,1]。

2　结果与分析

2.1　生成梯形特征空间散点图

Toby Carlson 的研究已表明:沙漠可视为地表裸露的干土,反照率几近于裸露的干土反照率;水体可视为地表裸露的湿土,反照率等于裸露的湿土反照率[32]。基于此并考虑了不同植被覆盖条件的地表反照率特征,在无覆盖、少覆盖、多覆盖和全覆盖四类植被覆盖度区域内划定样方(图 3)。获得样方内对应格网点的植被覆盖率和地表反照率值,剔除异常值(FVC <0,或 FVC> 1)后绘制反照率/植被覆盖梯形特征空间散点图(图 4)。

2.2　土壤湿度估算模型的建立

刘培君等研究表明 SM 与地表反照率或裸土反照率呈自然对数关系[33]。因此,根据实测 SM 值和对应样点的地表反照率或裸土反照率值通过回归分析建立估算模型和确定精度系数 R^2(表 1),从 R^2可以看出,裸土反照率模型的准确性要明显高于地表反照率模型。

2.3　模型精度分析

实测数据与 SM 估算模型之间的误差分析(表 2)表明:除 01、02、11 和 12 号点外,所有裸土反照率模型结果的 AE 和 RE 都小于地表反照率模型,RMSE、MAPE、TIC 和 R^2值皆是裸土反照率模型小于地表反照率模型。此外,本文拟合度(R^2 = 0.92)与同类研究(R^2 = 0.57)和同流域研究(R^2 = 0.79)比较精度都有所提高[34-35]。结果表明裸土反照率模型能有效地消除植被覆盖对地表土壤光谱的影响,明显地提高了 SM 的估算精度。

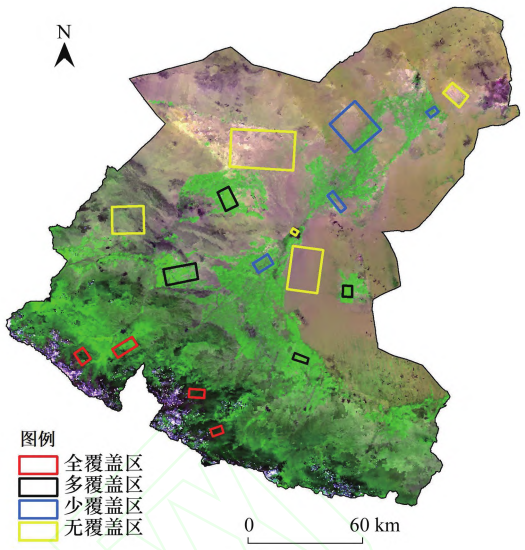

图 3　不同植被覆盖度下样方分布

Fig.3　Sample distribution under different vegetation coverage

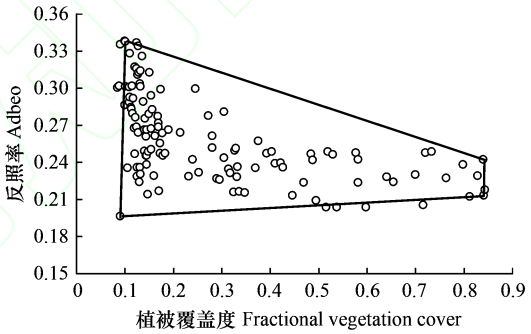

图 4　植被覆盖度/表面反照率梯形特征空间散点图

Fig. 4　Trapezoidal feature space scatter plot of vegetation coverage / surface albedo

表 1　地表反照率/裸土反照率的土壤水分回归模型

Table 1　Sregression model of surface albedo / bare soil albedo

名称 Name	模型 Model	R^2
地表反照率模型 Surface albedo model	$P = -26.8\ln(x) - 15.885$	0.5136
裸土反照率模型 Bare soil albedo model	$P = -43.01\ln(x) - 41.858$	0.8007

表 2　模型的精度分析与比较

Table 2　Accuracy analysis and comparison of models

序号 Number	实测样点 Measured points			地表反照率模型 Surface albedo model			裸土反照率模型 Bare soil albedo model		
	经度 Longitude	纬度 Latitude	SM 实测 SM measured value/%	估算值 Estimated value/%	AE	RE/%	估算值 Estimated value/%	AE	RE/%
01	103.634	39.133	10.87	10.96	0.09	0.81	10.72	0.15	1.36
02	103.638	39.132	8.57	11.10	2.53	29.52	4.63	3.94	45.92

续表

序号 Number	实测样点 Measured points			地表反照率模型 Surface albedo model			裸土反照率模型 Bare soil albedo model		
	经度 Longitude	纬度 Latitude	SM 实测 SM measured value/%	估算值 Estimated value/%	AE	RE/%	估算值 Estimated value/%	AE	RE/%
03	103.250	38.771	3.12	6.40	3.28	105.05	2.93	0.19	6.21
04	102.935	38.451	12.11	22.62	10.51	86.80	10.19	1.92	15.89
05	102.903	38.413	17.04	22.62	5.58	32.76	18.04	1.00	5.89
06	102.846	38.377	17.26	25.66	8.40	48.66	18.04	0.78	4.54
07	102.756	38.205	24.63	26.21	1.58	6.42	25.68	1.05	4.27
08	102.654	37.922	26.61	25.25	1.36	5.11	26.88	0.27	1.03
09	102.710	38.098	27.32	20.12	7.20	26.35	24.35	2.97	10.87
10	102.204	37.911	20.72	25.19	4.47	21.57	24.22	3.50	16.88
11	102.183	37.891	24.30	23.72	0.58	2.39	20.30	4.00	16.45
12	102.011	37.833	26.5	27.25	0.75	2.84	24.03	2.47	9.33
				RMSE = 4.68, MAPE = 30.69%, TIC = 0.31, R^2 = 0.67			RMSE = 2.30, MAPE = 11.55%, TIC = 0.14, R^2 = 0.92		

2.4 土壤湿度空间分布

参考 WU Chengyong 在青海对土壤水分的分级标准[36],结合研究区 SM 实际状况,对石羊河流域全年平均土壤水分分级(图 5),结果显示流域内土壤水分整体较低,上游至下游土壤水分依次递减,且各级区域依次相邻分布。其中,SM 大于 25% 的区域 1254.53km^2,占比最低为 3.09%,主要分布在流域西南部祁连山山麓地带;SM 为 15%—25%的区域面积占比 8.68%;这两级皆分布在海拔较高区域,中游仅红崖山水库区有小范围分布;SM 为 7%—15%的区域占比最高为 33.91%,主要分布于凉州农灌区和民勤绿洲邻近水库部分;SM 小于 7%的区域则分布在民勤县荒漠区。

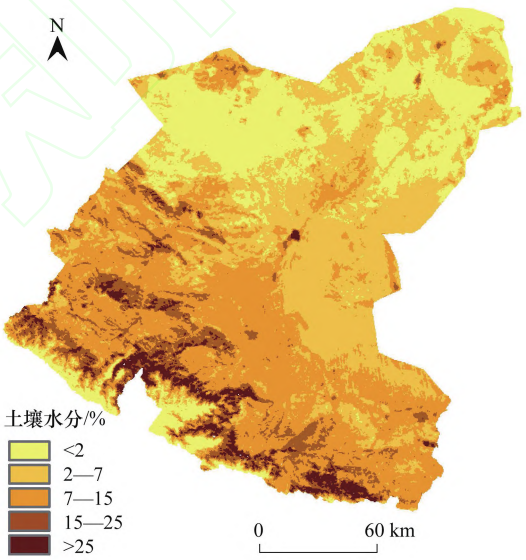

图 5 土壤水分空间分布

Fig.5 Spatial distribution of soil moisture

2.5 土壤水分稳定性

用 2018 年 10 月—2019 年 11 月的 46 期 SM 数据,依据式(3)计算 SM 的稳定性(图 6(a)),反映土壤水分的年内变化。良好的稳定性代表 SM 几乎保持不变,受季节变化和外部影响较小;差的稳定性则变化较大,不利于 SM 的保持。图 6(a)表明:稳定性最好的区域主要分布于下游,因为该区域常年裸露且 SM 值低。稳定性较好的区域主要分布于中游和民勤绿洲,稳定性差的区域主要分布于上游,但占比最小,主要受林地植被覆盖随季节变化和积雪的影响。SM 不同水平稳定性的面积占比如图 6(b)所示。

2.6 SM 空间自相关特征

利用 ArcGIS 和 Geoda 软件分析研究区土壤水分的空间聚集特征,全局 Moran′s I 系数为 0.88(Z-score = 1852.94, P <0.01),表明石羊河流域 SM 存在强烈的全局空间自相关性; Moran′s I 散点图如图 7 所示,样点主要分布在第一(高-高,正相关,占总散点 41.95%)和第三象限(低-低,正相关,占总散点 57.97%),表明研究区 SM 值呈现高-高和低-低聚集格局。

此外,基于局域 Moran′s I 指数分析(P <0.05)得到局部空间自相关特征(图 8)。SM 聚类被分为四种类

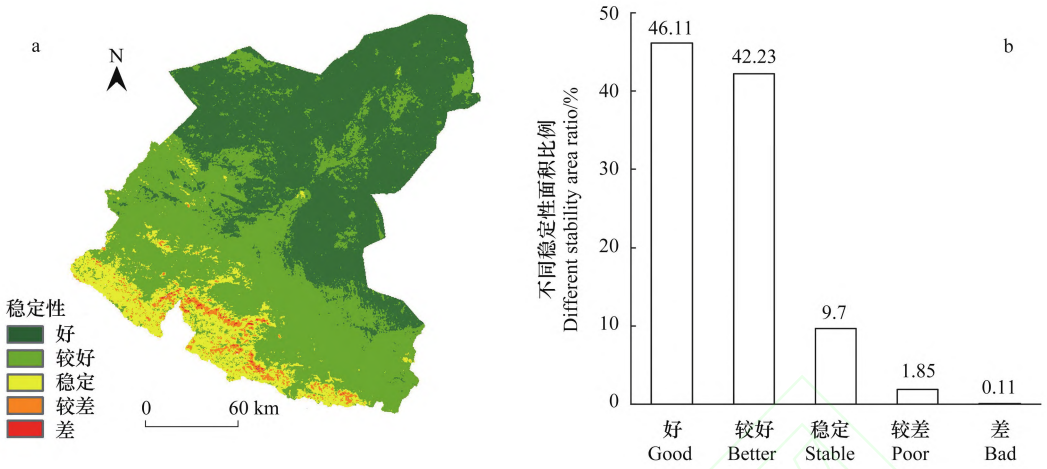

图 6　土壤水分稳定性特征

Fig.6　Characteristics of soil moisture stability

型:高-高(正空间自相关,占 21.95%),主要分布于石羊河上游的肃南、天祝、武威、永昌等地;低-低(正空间自相关,占 30.33%),主要集中分布于下游民勤荒漠区;低-高(负空间自相关,占 0.04%)和高-低(负空间自相关,占 0.01%)区域占比极低,且未出现聚集特征。中游区域则未表现出显著的空间自相关特征。

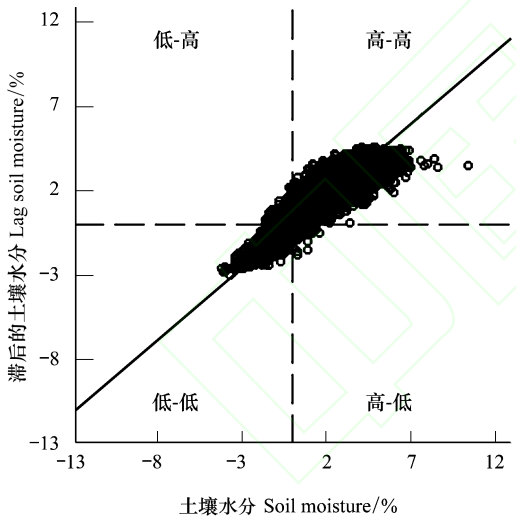

图 7　土壤水分全局 Moran's I 系数散点图

Fig.7　Scatter plot of soil moisture global Moran's I coefficient

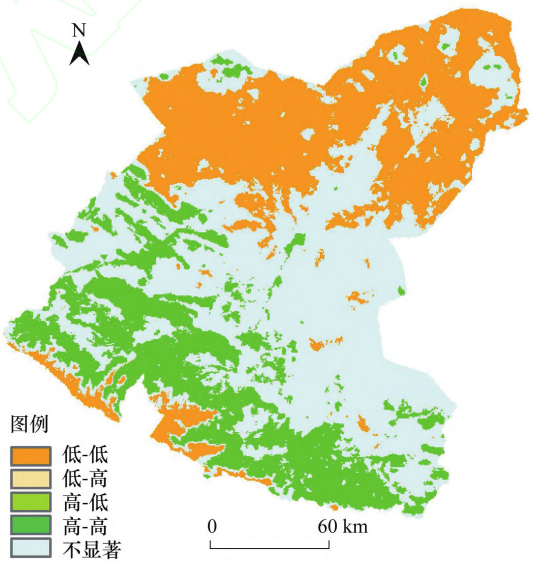

图 8　土壤水分聚类分布图

Fig.8　Soil moisture cluster distribution

2.7　空间分异分析

利用地理探测器模型对 SM 空间分异特征归因,按照不同因子对 SM 空间分异特征的解释能力排序:植被覆盖度($q=0.42$,$P<0.001$)>土壤类型($q=0.37$,$P<0.001$)>高程($q=0.22$,$P<0.001$)>土地利用($q=0.09$,$P<0.001$)。表明 FVC 是该地区 SM 空间分布的主导因素,土壤类型次之。风险探测分析(图 9)和交互探测器分析(表 3)表明:不同土地利用对 SM 的影响存在差异,其中林地 SM 均值最大,耕地次之,未利用地最小。不同土壤类型对 SM 的影响也存在较大差异。且 SM 往往不受单因子作用,而是多因子协同交互影响。表 3 得出,交互作用最强的因子组合为土壤类型和植被覆盖度($q=0.503$),说明土壤类型的不同显著增加了 FVC 对 SM 的

解释力。因子组合皆产生了较高的 q 值,同时因子交互作用表现为较强的非线性增强交互作用,且两因子对 SM 空间分布的影响有显著差异。

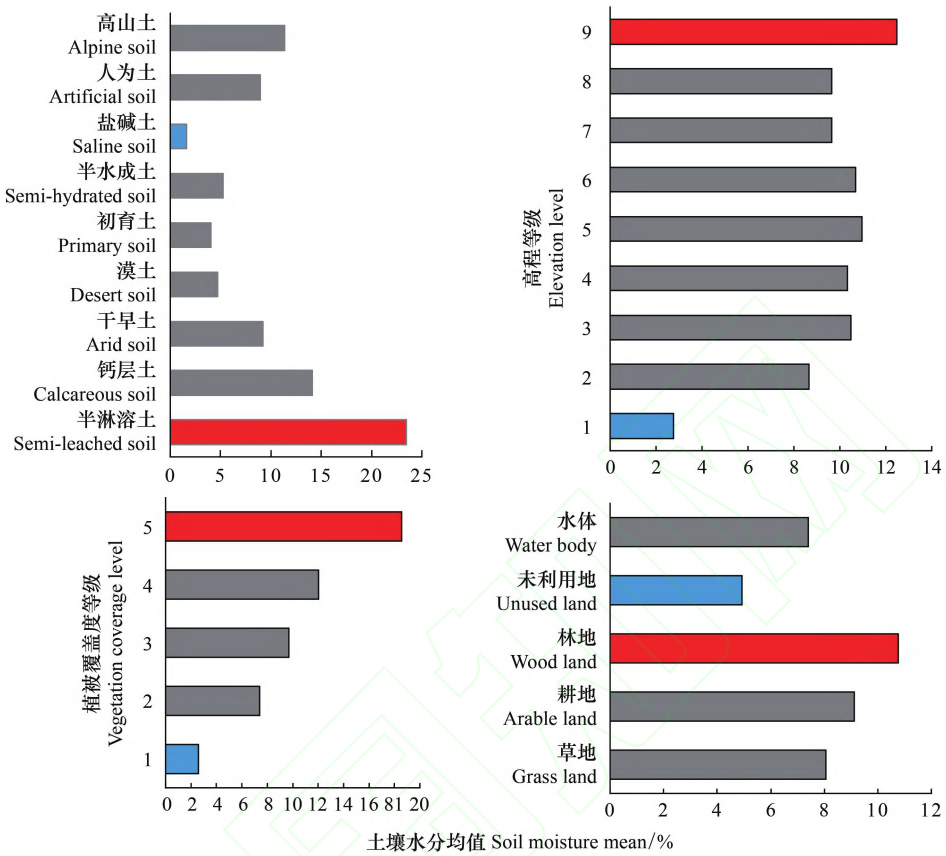

图 9 风险探测器结果

Fig.9 Results of risk detector

表 3 交互探测器和生态探测器结果

Table 3 Results of interactive detector and ecological_detector

	土地利用 Land use	土壤类型 Soil type	植被覆盖度 Vegetation coverage	高程 Elevation
土地利用 Land use	0.092			
土壤类型 Soil type	0.404 *	0.374		
植被覆盖度 Vegetation coverage	0.430 *	0.503 *	0.420	
高程 Elevation	0.253 *	0.458 *	0.473 *	0.223

表示非线性增强,且两因子对 SM 空间分布的影响存在显著差异(显著性水平为 0.05 的 t 检验)

3 讨论

空间统计不同土壤类型的 SM 特征(表 4)表明:石羊河流域内半淋溶土面积最小,主要分布在海拔较高的山谷和阴坡,其 SM 均值最高为 24.28%。钙层土和干旱土依次与半淋溶土邻近分布,其 SM 均值也相对较高。漠土和初育土分布广泛,覆盖中下游广大区域,该土壤类型区内无河流分支,植被稀少,蒸散发强烈,故 SM 均值较低。半水成土主要分布在武威和民勤绿洲边缘区,处在初育土和人为土的过渡带,盐碱土零星分布在初育土中,SM 值皆较低。而人为土分布在中游,主要由灌溉农田组成。高山土分布在流域内海拔最高的西北部高山区,该区域常年气温较低,林地植被郁闭度较高,土壤腐殖质层厚,蒸发量小,益于 SM 的保持。

这种现象与其自身的理化性质、地形因素、局地气候和植被郁闭度等有关,这些因素对 SM 的有效保持和空间分布都产生了重要的影响[37]。

表 4　石羊河流域主要土壤类型的土壤水分特征

Table 4　Soil moisture characteristics of the main soil types in the Shiyang River Basin

土壤类型 Soil type	面积 Area/km^2	最小值 Minimum/%	最大值 Maximum/%	平均值 Mean/%	标准差 Standard deviation
半淋溶土 Semi-leached soil	964	3.05	63.85	24.28	10.23
钙层土 Calcareous soil	4994	0.18	71.21	14.17	6.57
干旱土 Arid soil	3571	1.59	32.77	9.37	4.98
漠土 Desert soil	5911	0.72	32.26	4.27	4.75
初育土 Primary soil	14080	0.30	30.52	4.11	4.30
半水成土 Semi-hydrated soil	1299	1.85	34.43	4.79	3.92
盐碱土 Saline soil	1442	0.68	24.83	2.08	4.76
人为土 Artificial soil	4023	1.95	28.62	9.03	3.13
高山土 Alpine soil	4006	2.23	56.67	11.14	10.77

为探讨不同土地利用类型的土壤水分特征,依据土地利用图(图 10)空间统计各土地利用的 SM 状况(表 5)。草地大部分处于中等以下水平,其中较干区域占 29.79%,中等湿度区域占 53.48%。耕地 SM 大部分处于中等水平,其中中等湿度区域占 69.92%。结合图 6,发现草地与耕地的 SM 稳定性较好。林地 SM 整体较高,中等湿度及以上部分占 80.97%。未利用地大部分的 SM 较低,其中干土壤 44.7%,较干土壤 49.63%。不同的土地利用类型对 SM 有重要影响,林地在涵养土壤水分方面优于耕地和草地[38]。

表 5　不同土地利用的不同土壤水分百分比

Table 5　Different soil moisture percentages for different land uses

土地利用 Land use	干 Dry /%	较干 Drier /%	中等 Medium /%	较湿 Wetter/%	湿润 Moist/%	总计 Total/%
草地 Grass land	5.57	29.79	53.48	10.80	0.34	100
耕地 Arable land	1.94	23.53	69.92	4.55	0.04	100
林地 Wood land	11.19	7.79	27.96	34.06	18.95	100
未利用地 Unused land	44.70	49.63	5.54	0.10	0.00	100
水体 Water body	33.97	7.94	16.19	15.24	26.67	100
建设用地 Construction land	0.00	9.38	19.53	60.16	10.94	100

土壤水分和植被覆盖度空间相关性分析(图 11)表明:SM 和 FVC 具有较强的相关性,植被覆盖度对土壤水分产生了重要的影响,凉州区和民勤县低海拔区表现为负向强相关($R=-0.57$, $P<0.01$),其中草地占 66.51%,耕地占 25.96%。主要因为该区域降水稀少、蒸散发强烈,浅根系植被水分吸收以地表土壤水为主,不利于土壤水的保持,但耕地长期耕作土壤质地松软且有灌溉水源,因此耕地占比较小。FVC 与 SM 存在负相关($R=-0.37$, $P<0.01$)区域则主要分散在下游,该区域靠近巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠,沙漠化效应影响较大。结论与柳菲等研究结论基本一致[39]。上游高海拔区域 SM 与 FVC 则为正向强相关($R=0.49$, $P<0.01$),其中林地占 80.16%,海拔较高区域的 FVC 与 SM 为正相关($R=0.13$, $P<0.01$),其中林地占 38.25%,因此林地对 SM 表现出了正向影响。

李浙华等[40]研究显示,土壤水分通常受到气候、水文、地形、植被覆盖度以及人类活动等因素的影响。但在小尺度上气象和水文要素基本一致,地形、植被和土地利用的变化则成为影响 SM 保持和变化的重要因素。植被覆盖度高的区域地表蒸散发较小,有利于 SM 保持。同时,不同高程也有影响作用,上游高海拔区域温度较低且多为林地,使地表蒸散发更小,且植被多为高大灌木,根系发达,水分吸收多源于深层土壤。而下游植

被则多为草本和农田,冠层密度低且根系较浅,主要吸收地表土壤水。从而不同的高程和土地利用影响了植被对土壤水分的影响程度。

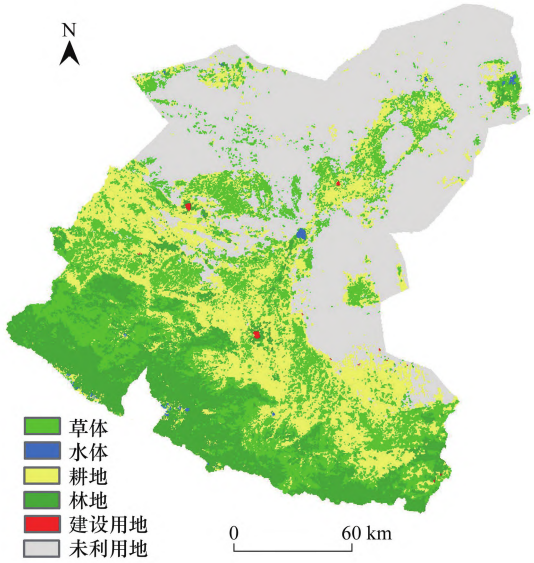

图 10 土地利用类型

Fig.10 Types of land use

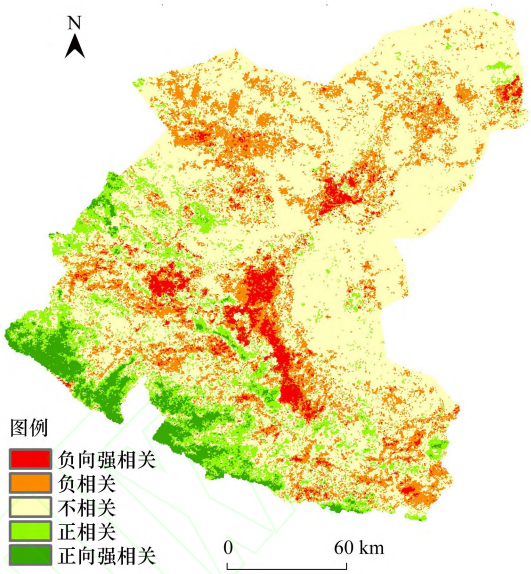

图 11 土壤水分与植被覆盖相关性

Fig.11 Correlation between soil moisture and vegetation cover

限于作者水平,高山地区冰川积雪对土壤水分遥感估算的影响有待于后续深入研究,以期进一步提高土壤水分的遥感估算精度。

4 结论

(1)通过地表反照率和植被覆盖度构建梯形特征空间计算裸土反照率,进而估算地表土壤水分,可明显地消除植被覆盖的影响,提高遥感土壤水分估算精度,为流域尺度的 SM 计算提供了方法参考。该模型适用于石羊河流域,结果符合研究区实际情况。

(2)石羊河流域土壤水分表现出西南高东北低的态势,上游至下游 SM 值逐渐降低,SM 值大于 15%的区域面积为 11.77%,主要分布在上游高海拔区域,SM 值 7%—15%的区域面积为 33.91%,主要分布在武威绿洲和民勤绿洲邻近水库部分,SM 值小于 7%的区域面积为 54.32%,主要分布在下游民勤境内的荒漠区。

(3)石羊河流域 SM 空间自相关特征显著,高-高聚集主要分布于石羊河上游林地,占研究区 21.95%,低-低聚集主要集中分布于下游民勤的荒漠,占研究区 30.33%。上游林地区 SM 呈高高聚集,下游荒漠区 SM 呈低低聚集。土壤水分和植被覆盖度存在显著相关性且不同土地利用影响程度存在差异,上游林地与 SM 呈显著正相关($R=0.49$,$P<0.01$),中游草地与 SM 呈显著负相关($R=-0.57$,$P<0.01$)。

(4)石羊河流域植被覆盖因素对 SM 的空间差异解释力最强,各因子对 SM 空间分异的解释能力存在显著差异,且因子间交互作用均增强了其对 SM 空间分异的解释力。

(5)石羊河流域土壤水分稳定性整体较好,中下游皆表现为稳定。不同土地利用类型的 SM 差异较大,未利用地大部分 SM 小于 7%,大部分草地和耕地 SM 处于中等水平,SM 值为 7%—15%,林地 SM 值大于 25%,水平整体较高。

参考文献(References):

[1] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, Hirschi M, Jaeger E B, Lehner I, Orlowsky B, Teuling A J. Investigating soil moisture - climate interactions

in a changing climate: a review. Earth-Science Reviews, 2010, 99(3/4): 125-161.

[2] 包青岭, 丁建丽, 王敬哲, 刘婕, 马春玥. 基于 VIC 模型模拟的干旱区土壤水分及其时空变化特征. 生态学报, 2020, 40(9): 3048-3059.

[3] 范科科, 张强, 孙鹏, 宋长青, 朱秀迪, 余慧倩, 申泽西. 青藏高原地表土壤水变化、影响因子及未来预估. 地理学报, 2019, 74(3): 520-533.

[4] Crowther T W, Todd-Brown K E, Rowe C W, Wieder W R, Carey J C, Machmuller M B, Snoek B L, Fang S, Zhou G, Allison S D, Blair J M, Bridgham S D, Burton A J, Carrillo Y, Reich P B, Clark J S, Classen A T, Dijkstra F A, Elberling B, Emmett B A, Estiarte M, Frey S D, Guo J, Harte J, Jiang L, Johnson B R, Kröel-Dulay G, Larsen K S, Laudon H, Lavallee J M, Luo Y, Lupascu M, Ma L N, Marhan S, Michelsen A, Mohan J, Niu S, Pendall E, Peñuelas J, Pfeifer-Meister L, Poll C, Reinsch S, Reynolds L L, Schmidt I K, Sistla S, Sokol N W, Templer P H, Treseder K K, Welker J M, Bradford M A. Quantifying global soil carbon losses in response to warming. Nature, 2016, 540(7631): 104-108.

[5] Jaeger E B, Seneviratne S I. Impact of soil moisture - atmosphere coupling on European climate extremes and trends in a regional climate model. Climate Dynamics, 2011, 36(9/10): 1919-1939.

[6] Guillod B P, Orlowsky B, Miralles D G, Teuling A J, Seneviratne S I. Reconciling spatial and temporal soil moisture effects on afternoon rainfall. Nature Communications, 2015, 6: 6443.

[7] 郭维栋, 马柱国, 姚永红. 近 50 年中国北方土壤湿度的区域演变特征. 地理学报, 2003, 58(S1): 83-90.

[8] Hauser M, Orth R, Seneviratne S I. Role of soil moisture versus recent climate change for the 2010 heat wave in western Russia. Geophysical Research Letters, 2016, 43(6): 2819-2826.

[9] 聂艳, 马泽玥, 周逍峰, 于雷, 于婧. 阿克苏河流域土壤湿度反演与监测研究. 生态学报, 2019, 39(14): 5138-5148.

[10] 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 周清波, 陈仲新. 农作物空间格局遥感监测研究进展. 中国农业科学, 2010, 43(14): 2879-2888.

[11] Shafian S, Maas S J. Index of soil moisture using raw landsat image digital count data in Texas High Plains. Remote Sensing, 2015, 7(3): 2352-2372.

[12] Zhao S H, Wang Q, Zhang F, Yao Y J, Qin Q M, You L, Li J P, Wu Y T, Liu S H, Li Y. Drought mapping using two shortwave infrared water indices with MODIS data under vegetated season. Journal of Environmental Informatics, 2013, 21(2): 102-111.

[13] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2/3): 213-224.

[14] Zhao S H, Yang Y H, Qiu G Y, Qin Q M, Yao Y J, Xiong Y J, Li C Q. Remote detection of bare soil moisture using a surface-temperature-based soil evaporation transfer coefficient. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2010, 12(5): 351-358.

[15] Roerink G J, Su Z, Menenti M, et al. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. Physics and Chemistry of The Earth Part B-hydrology Oceans and Atmosphere, 2000, 25(2): 147-157.

[16] Zhang D J, Tang R L, Tang B H, Wu H, Li Z L. A simple method for soil moisture determination from LST - VI feature space using nonlinear interpolation based on thermal infrared remotely sensed data. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(2): 638-648.

[17] 王玉纯, 赵军, 付杰文, 魏伟. 石羊河流域水源涵养功能定量评估及空间差异. 生态学报, 2018, 38(13): 4637-4648.

[18] Jalilvand E, Tajrishy M, Ghazi Zadeh Hashemi S A, Brocca L. Quantification of irrigation water using remote sensing of soil moisture in a semi-arid region. Remote Sensing of Environment, 2019, 231: 111226.

[19] 魏伟, 赵军, 王旭峰. 石羊河流域土地利用类型景观异质性. 生态学杂志, 2010, 29(4): 760-765.

[20] 高超, 赵军, 王玉纯, 金贵峻, 王建邦, 胡秀芳. 石羊河流域自然植被对生态系统服务的约束效应研究. 生态学报, 2020, 40(9): 2851-2862.

[21] Liang S L. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: algorithms. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(2): 213-238.

[22] Cai G, Xue Y, Hu Y, Wang Y, Guo J, Luo Y, Wu C, Zhong S, Qi S. Soil moisture retrieval from MODIS data in northern China Plain using thermal inertia model. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(16): 3567-3581.

[23] 田静, 苏红波, 孙晓敏, 陈少辉. 遥感反演土壤蒸发/植被蒸腾二层模型在华北地区的应用. 地理研究, 2009, 28(5): 1297-1306.

[24] 李丽丽, 王大为, 韩涛. 2000-2015 年石羊河流域植被覆盖度及其对气候变化的响应. 中国沙漠, 2018, 38(5): 1108-1118.

[25] Gascoin S, Ducharne A, Ribstein P, Perroy E, Wagnon P. Sensitivity of bare soil albedo to surface soil moisture on the moraine of the Zongo glacier (Bolivia). Geophysical Research Letters, 2009, 36(2): L02405.

[26] Zhang R H, Tian J, Su H B, Sun X M, Chen S H, Xia J. Two improvements of an operational two-layer model for terrestrial surface heat flux retrieval. Sensors, 2008, 8(10): 6165-6187.

[27] Tong S Q, Zhang J Q, Bao Y H, Wurina, Terigele, Weilisi, Lianxiao. Spatial and temporal variations of vegetation cover and the relationships with climate factors in Inner Mongolia based on GIMMS NDVI3g data. Journal of Arid Land, 2017, 9(3): 394-407.

[28] Zhao Z M, Shen Y X, Wang Q H, Jiang R H. The temporal stability of soil moisture spatial pattern and its influencing factors in rocky

environments. CATENA, 2020, 187: 104418.
[29] 霍霄妮, 李红, 孙丹峰, 张微微, 周连第, 李保国. 北京耕作土壤重金属含量的空间自相关分析. 环境科学学报, 2009, 29(6): 1339-1344.
[30] 韦仕川, 熊昌盛, 栾乔林, 胡月明. 基于耕地质量指数局部空间自相关的耕地保护分区. 农业工程学报, 2014, 30(18): 249-256.
[31] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
[32] Carlson T. An overview of the "Triangle Method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery. Sensors, 2007, 7(7): 1612-1629.
[33] 刘培君, 张琳, 艾里西尔·库尔班, 常萍, 李良序, 赵兵科. 用 TM 数据估测光学植被盖度的方法. 遥感技术与应用, 1995, 10(4): 9-14.
[34] 李萍, 赵庚星, 高明秀, 常春艳, 王卓然, 张同瑞, 安德玉, 贾吉超. 黄河三角洲土壤含水量状况的高光谱估测与遥感反演. 土壤学报, 2015, 52(6): 1262-1272.
[35] 魏伟, 任皓晨, 赵军, 王旭峰. 基于 MODIS 的 ATI 和 TVI 组合法反演石羊河流域土壤含水量. 国土资源遥感, 2011, (2): 104-109.
[36] Wu C Y, Cao G C, Chen K L, E C Y, Mao Y H, Zhao S K, Wang Q, Su X Y, Wei Y L. Remotely sensed estimation and mapping of soil moisture by eliminating the effect of vegetation cover. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(2): 316-327.
[37] 潘温琪, 吕宁, 张梅芬, 杜先兵. 珠江源马雄山低山区不同土地利用类型土壤水分空间差异分析. 现代农业研究, 2020, 26(4): 29-30.
[38] 张敏, 刘爽, 刘勇, 张红. 黄土丘陵缓坡风沙区不同土地利用类型土壤水分变化特征. 水土保持学报, 2019, 33(3): 115-120, 128-128.
[39] 柳菲, 陈沛源, 于海超, 马金珠. 民勤绿洲不同土地利用类型下土壤水盐的空间分布特征分析. 干旱区地理, 2020, 43(2): 406-414.
[40] 李浙华, 李生宇, 李丙文, 范敬龙, 蒋进, 李亚萍, 宋春武. 不同植被覆盖度沙垄土壤化学性质的空间分异. 干旱区研究, 2020, 37(1): 160-167.