

基于TVDI的藏北地区土壤湿度空间格局

宋春桥^{1,2,3}, 游松财⁴, 刘高焕¹, 柯灵红^{1,2}, 钟新科^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 香港中文大学地理与资源管理系, 香港; 4. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081)

摘 要:利用2010年DOY 209期的Terra/MODIS 16 d合成的植被指数(EVI)产品数据MOD13 A2和8 d天合成的地表温度(LST)产品数据MOD11 A2, 构建LST-EVI特征空间, 从而得到了条件温度植被干旱指数TVDI反映的藏北土壤湿度空间分布图。结合野外同步土壤表层含水量测试数据, 二者表现出较好的相关程度, 并通过0.05水平的显著性检验。对藏北地区土壤湿度的空间格局和分异规律分析, 研究结果表明: ①藏北全区TVDI值呈正态分布, 东部地区偏湿, 中部地区多数为正常湿度, 而西部TVDI直方图分布形状与全区相似, 但偏旱; ②藏北地区不同气候区划内土壤湿度分异较大, 那曲高山谷地亚寒带半湿润区土壤湿度最高, 其空间变异也最强烈, 青南高原亚寒带半干旱区土壤干旱最严重; ③研究区内土壤湿度空间分布受海拔影响较为明显, 在海拔4500 m以下的地区土壤湿度随海拔升高而降低, 此后, 土壤湿度随着海拔升高而升高。

关 键 词:温度植被干旱指数; 藏北地区; 土壤湿度; MODIS; 空间格局

1 引言

土壤湿度作为气候、水文、农业、陆地生态环境、全球变化等多个研究领域的重要基础信息, 同时也是评价土地生产能力和退化的关键指标, 在土壤-植被-大气界面的物质和能量交换过程中发挥着重要作用^[1-2]。传统的土壤湿度信息获取主要利用地面观测站进行监测, 常见的方法有称重烘干法、中子法、电磁技术、TDR法等^[3-4], 其主要优点是精度高、取样灵活, 但是采样点数目有限且空间不连续, 并且人力、物力投入较大。为了获取大范围空间连续的土壤湿度信息, 多分辨率、多时相、近实时的遥感技术成为解决该问题的主要手段。目前, 对于土壤干湿状况监测方面比较成熟的遥感方法主要有热惯量法^[5]、蒸散量计算法^[6]、植被指数与地表温度结合法^[7]以及微波遥感法^[8]等。

在众多的土壤水分遥感信息模型中, 通过Ts-NDVI(Temperature of Surface, and Normalized Difference Vegetation Index)特征空间的变化特征综合反映土壤水分状况和实现植被旱情遥感监测, 在国内外得到了广泛研究和应用。在Ts-NDVI特征

空间关系的研究中, Nemani等^[9]认为二者表现为梯形的关系; 而Price^[10]、Carlson等^[11]、Sandholt等^[12]和Wan等^[13]分析了不同传感器得到的NDVI和Ts数据, 认为二者的特征空间表现为三角形的关系; Gillies等^[14]利用航空数据基于Ts-NDVI的三角形关系估测土壤有效水分含量; Goetz^[15]研究了不同分辨率(AVHRR、TM、SPOT等)下Ts-NDVI斜率与土壤湿度的关系; Sandholt等^[12]基于植被指数和地表温度的关系, 提出了温度植被干旱指数(Temperature Vegetation Drought Index, TVDI)估测土壤表层水分状况; Goward等^[16]研究影响Ts-NDVI斜率关系的各种因素, 并提出了估测土壤湿度的回归方程; 齐述华等^[17]利用温度植被干旱指数(TVDI)进行全国范围的旱情监测研究; 李正国等^[18]利用地表温度-植被指数特征空间分析黄土高原地表水分季节变化, 并且指出TVDI比单一利用温度或者植被指数来反映地表干湿状况能取得更好效果; 杨曦等^[19]基于NDVI和EVI(Enhanced Vegetation Index)两种植被指数与LST(Land Surface Temperature)构建特征空间反映土壤水分状况, 并分析其与降水等气象要素的关系, 取得了较理想的结果。

收稿日期: 2011-01; 修订日期: 2011-04.

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971132)。

作者简介: 宋春桥(1986-), 男, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要从事生态环境遥感、遥感与GIS应用等研究。

E-mail: chunqiao_song@163.com

通讯作者: 游松财, 男, 研究员, 研究方向为资源环境遥感与全球变化. E-mail: yousc@ieda.org.cn.

藏北地区地处青藏高原腹地,素有“江河源”、“生态源”、“中华水塔”之美誉,同时也是中国重要的牧业生产基地,但是生态环境十分脆弱^[20]。由于该区域气象站点十分稀少,并且缺少长年的土壤水分观测资料,而恶劣的生存条件使针对该区域宏观范围的土壤湿度探索研究与实地采样工作开展基本尚属空白。由于TVDI方法输入数据少、简单易行、生物物理学含义明确等特点,因此本研究利用Terra MODIS植被指数(EVI)与地表温度(Land Surface Temperature, LST)数据构建Ts-VI(Vegetation Index)特征空间提取温度植被干旱指数TVDI,用以反映藏北地区土壤干湿状况。同时采用同步采样获取的实地土壤表层水含量数据验证该方法的可行性,并进一步分析藏北地区土壤湿度的空间格局及分异规律。

2 研究方法

利用TVDI反演土壤湿度的原理,是基于水分蒸发和植被蒸腾对地表温度的降低作用。TVDI的值取决于Ts-NDVI的空间情况,地表蒸发与蒸腾作用对TVDI的影响源于对Ts-NDVI空间的影响。近年来一系列的研究表明,植被覆盖、土壤湿度(包含蒸发、蒸腾作用)、地表热特性及粗糙度、大气动力及入射辐射等对Ts与NDVI的关系都有影响^[21],而研究选用的影像传感器、分辨率及外界环境风速、气压等因素对其影响甚小^[16]。其中,土壤水分是Ts-NDVI空间的主要影响因素,并且NDVI基本能反映植被覆盖状况,因此从Ts-NDVI空间得到的TVDI,能从很大程度上反映土壤湿度的状况。

Price^[10]和Carlson等^[11]的研究发现,如果研究区植被覆盖包含从裸土到全覆盖,土壤湿度从极干旱到极湿润的各种情况,以遥感数据获得的Ts和NDVI为纵横坐标的散点图呈三角形。Sandholt等^[16]因此发展了温度植被干旱指数(TVDI)的土壤湿度监测方法,其表达式如下所示:

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s_{\min}}}{T_{s_{\max}} - T_{s_{\min}}} \quad (1)$$

式中: T_s 为任意像元的地表温度,本研究中用MODIS LST数据; $T_{s_{\max}} = a_1 + b_1 \times EVI$ 为某一EVI值对应的最高地表温度,即特征空间干边, a_1 、 b_1 是干边拟合方程的系数; $T_{s_{\min}} = a_2 + b_2 \times EVI$ 为某一EVI对应的最低地表温度,对应于图中 T_s -VI空间

的湿边, a_2 、 b_2 是湿边拟合方程的系数。将 $T_{s_{\max}}$ 与 $T_{s_{\min}}$ 的拟合代入式(1)得到TVDI的表达式如:

$$TVDI = \frac{LST - (a_2 - b_2 \times EVI)}{(a_1 - b_1 \times EVI) - (a_2 - b_2 \times EVI)} \quad (2)$$

TVDI的取值在0~1之间,TVDI值越大,表明该地区土壤水分缺失越严重。按照TVDI的原理,随着植被指数值的增加,陆地表面温度最大值逐渐降低,且与植被指数呈线性关系。但研究证明,植被指数与植被覆盖度并不总是呈线性关系。植被生长初期或比较稀疏的覆被VI将高估植被覆盖度,而覆盖度足够大的时候,则VI呈现饱和将低估实际覆盖,因此在分析温度随VI变化趋势,应选取大致落于0.10~0.85之间具有线性趋势的区域进行拟合和监测,视具体研究区域和时相而定。

3 研究区与数据处理

3.1 研究区与验证点位置

藏北地区西北起于昆仑山和唐古拉山,与新疆、青海交界,南抵念青唐古拉山,与日喀则、拉萨和林芝等地(市)相邻;东接昌都地区的边坝县和丁青县;西与阿里地区的改则县和措勤县相连。幅员辽阔,南北纵跨6个纬度带(30°27'25"~35°39'13"N),东西横越11个经度带(83°41'14"~95°10'46"E),平均海拔在4500m以上。作为重要的畜牧业生产基地,草地是该区域主要的生态系统。该地区气候突出特点是寒冷干燥,年平均气温在-2.8~1.6℃之间,年均最高温在4.70~9.2℃之间,年均最低温在-4.6~9.1℃之间。年降水量247.3~513.6mm,受大气环流和地形的影响,降水总体趋势表现为由东向西,由南向北递减。

受水平与垂直地带性影响,气候与水热条件区域间差异较大,植被覆盖从东南向西北依次出现亚高山疏林-灌丛草甸、高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠草原4大基带及相邻的过渡亚带^[22]。其土壤发育也呈现水平地带性和垂直地带性交错分布的特征,主要土壤类型有亚高山草甸土、高山草甸土、高山草原土、高山荒漠草原土等。藏北地区范围较大且地形复杂,垂直地带性叠加在水平地带性之上,土壤湿度空间变化相对复杂。由于采样环境条件及人力、时间所限,本文研究主要着重反映该地区土壤湿度的整体空间分布特征,野外采样点分布较为稀疏,共24个(图1)。

3.2 数据准备与处理

研究数据来自 NASA-Land Processes DAAC 数据中心,包括 Terra MODIS 地表温度产品 MOD11 A2 和植被指数产品 MOD13 A2,数据时相覆盖实地采样的时间段。Terra 卫星系对地观测系统(EOS)计划于 1999 年 12 月发射的陆面和近地资源环境监测卫星,每天两次经过全球大部分地区,其过境时间为地方时上午 10:30。MOD11A2 为 8 d 合成空间分辨率为 1 km 的地表温度(LST)产品,包含白天 LST、夜间 LST、31 和 32 波段通道发射率及质量控制等资料。MOD13A2 是 Terra 卫星 16d 合成空间分辨率为 1 km 的植被指数产品,包含 NDVI、EVI、几个主要波段反射率以及其他辅助信息。

野外土壤湿度采样数据使用 Hydra 土壤测试仪测定,该仪器可以方便地同时测量出土壤含水量(WFV)、土壤盐分(NaCl)和土壤温度(TC)等 3 个参数,主要是测量 0~10 cm 表层土壤水分体积含量。该仪器的测量精度在大量研究中已得到验证和评价^[23],适宜于藏北地区土壤成分的测量,采样时间为 2010.07.26-2010.08.07。考虑到遥感影像像元分辨率 1 km,因此实地采集数据时每个样地设计约 1 km × 1 km 的范围,按对角线每隔 100~150m 距离取一个样点,即每个样方采集 20~25 个样点,剔除其中的异常值,对剩下点值取平均得到该样地的土壤体含水量,以尽量反映像元内的土壤湿度情况。使用上述数据和方法,提取温度植被干旱指数并验证分析藏北地区土壤湿度的流程如图 2 所示。

4 结果与分析

4.1 Ts-VI 特征空间及干、湿边模拟

在数据预处理基础上,建立 LST-EVI 二维特征

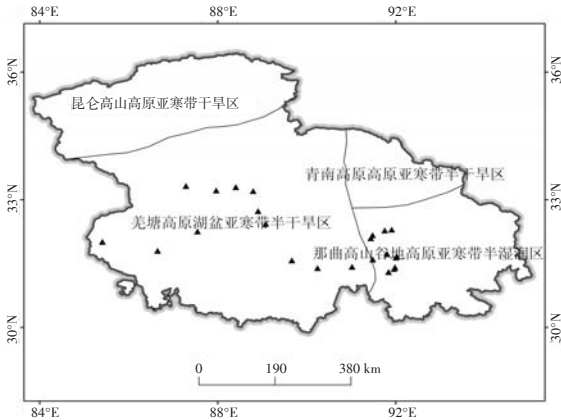


图 1 研究区气候区划及验证样点分布图
Fig.1 Climatic divisions in the study area and identification sampling points

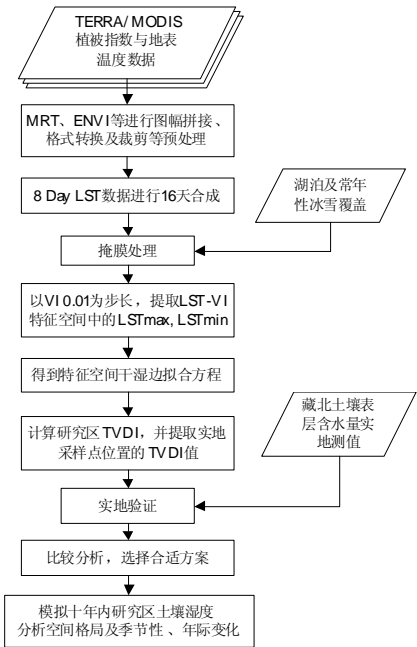


图 2 藏北地区土壤湿度模拟流程图

Fig.2 Procedure of calculating soil moisture in northern Tibet

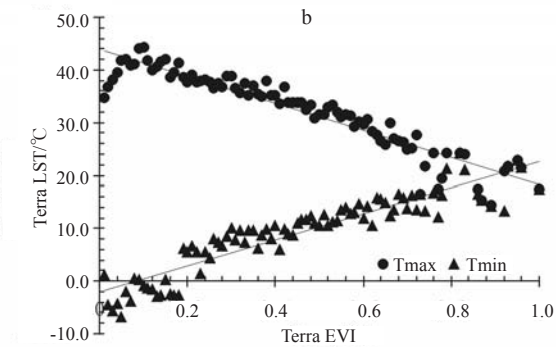
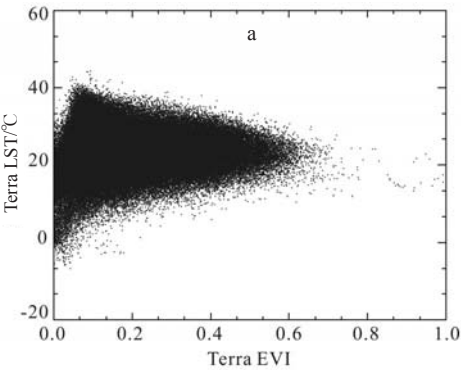


图 3 LST-EVI 特征空间及干湿边拟合

Fig.3 LST-EVI spatial pattern of scattered points with a small VI interval and fitting of dry-edge and wet-edge

空间(图 3a),以 0.01 为步长,在 EVI 0~1 值域范围内,提取具有相同植被指数值(值域,如 0.01~0.02)所有像元对应 LST 值中的最大、最小值,以获取特征空间拟合干湿边的点对(图 3b)。从图中可以看出植被指数与地表温度的像元对散点分布呈现较好的三角形关系,能够很好地拟合干湿边方程。由于在植被覆盖度极低甚至裸土,或者植被覆盖度极高的情况下,植被指数反映覆被实际情况将会出现偏差,如图干湿边拟合的两端相对较离散,将影响拟合的斜率和精度。从图 3a 的散点分布可以看出,为了使拟合方程整体效果较好,去除 EVI 值低于 0.05 及高于 0.85 的散点不参与线性回归拟合,以保证干湿边拟合能满足大部分像元的 TVDI 提取精度。其中拟合湿边方程为 $T_{s_{min}} = 26.51 \times EVI - 2.34$ ($R^2 = 0.854$),干边方程为 $T_{s_{max}} = -27.45 \times EVI + 45.15$ ($R^2 = 0.906$)。

4.2 土壤湿度遥感监测结果的实地验证

利用 2010.07.26-2010.08.07 期间于藏北地区采样的 25 个(图 1 中三角点符所示)实地表层 0~10 cm 土壤湿度数据与相应位置的 TVDI 数据进行相关性分析。基于遥感数据源提取土壤干湿状况的时相与采样时间基本吻合,两颗卫星数据的合成期均覆盖采样时间的 85% 左右。由于研究区域内植被变化比较单一,且本文旨在监测全区的土壤干湿空间分布及分异规律而不是获取土壤绝对含水量,因此基于 1 km×1 km 范围对角线上多样点测量取平均的方法得到实地数据验证 TVDI 反映的藏北地区土壤干湿状况是可行的。图 4 中横坐标代表实测土壤表层土壤水分体积百分比值,纵坐标为采样点所在位置遥感提取的 TVDI 值。从图 4 可以看出,温度植被干旱指数与土壤表层含水量实测值之间表现显著的相关性,相关系数 R^2 达到 0.523。TVDI 和土壤湿度的线性拟合结果均通过了 $\alpha = 0.05$ 置信度的 t 检验且相关性较好,这说明温度植被干旱指数能够反映土壤水分状况变化趋势,作为旱情评价指标是有一定的合理性。随着土壤湿度增大,TVDI 值呈现明显的减小趋势。

4.3 藏北地区土壤湿度空间格局分析

(1) 土壤干湿整体状况

根据整个研究区域像元 TVDI 值的直方图分布特征,对 Terra LST-EVI 特征空间提取的 TVDI 分布图反映的干湿状况进行分级:湿润($0.00 \leq TVDI < 0.30$)、偏湿($0.30 \leq TVDI < 0.50$)、正常($0.50 \leq TVDI <$

0.60)、偏旱($0.60 \leq TVDI < 0.75$)和干旱($0.75 \leq TVDI < 1.00$)。从 TVDI 反映的藏北土壤湿度情况来看(图 5),区域土壤干湿存在明显的空间分异规律:总体上从东到西、由南向北土壤湿度降低,在这种总体趋势上叠加局部地形影响的土壤干湿变化。湿润地区主要集中在东南部及湖泊岸带和唐古拉山、念青唐拉山、昆仑山等几大山脉海拔较高的冰雪覆盖区周围;在中部和西北部大部分区域存在大片土壤偏旱或严重干旱的情况,特别是色林错湖北部广大地区干旱情况严重。

(2) TVDI 的分区统计

对整个藏北地区以及东、中、西 3 个分区的 TVDI 进行直方图统计分析,以进一步探讨藏北不同地区的干湿状况。东部地区包括巴青、比如、索县和嘉黎,中部地区包括安多、聂荣和那曲,西部地区包括申扎、班戈、双湖和尼玛县。

图 6 反映全区及不同分区的 TVDI 值分布规

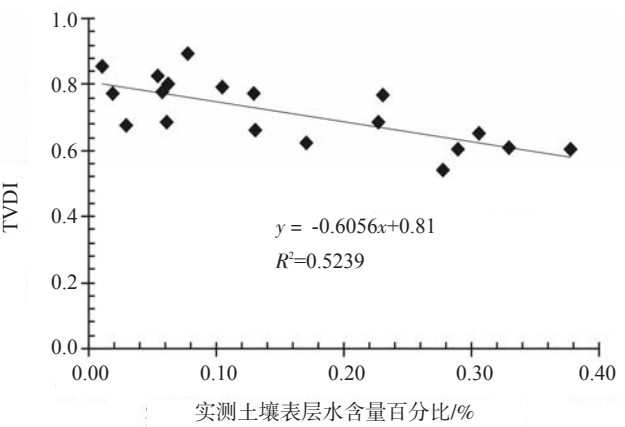


图 4 TVDI 与实测表层土壤水含量的相关关系

Fig.4 Relations between TVDI and measured top soil moisture

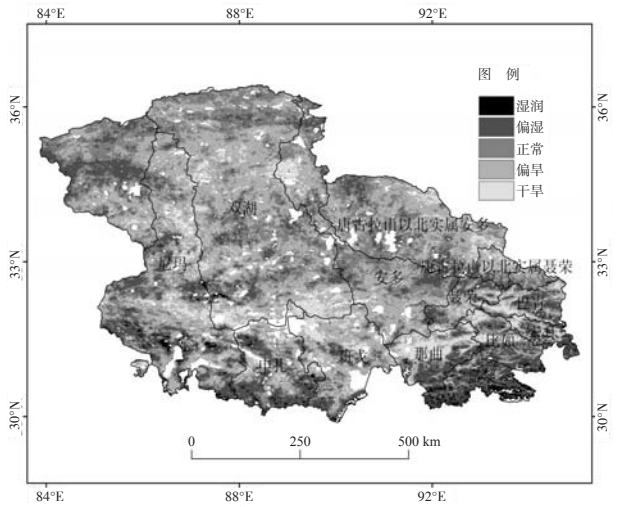


图 5 TVDI 指示藏北地区土壤干湿状况分级图

Fig.5 Levels of soil moisture over the northern Tibet Plateau

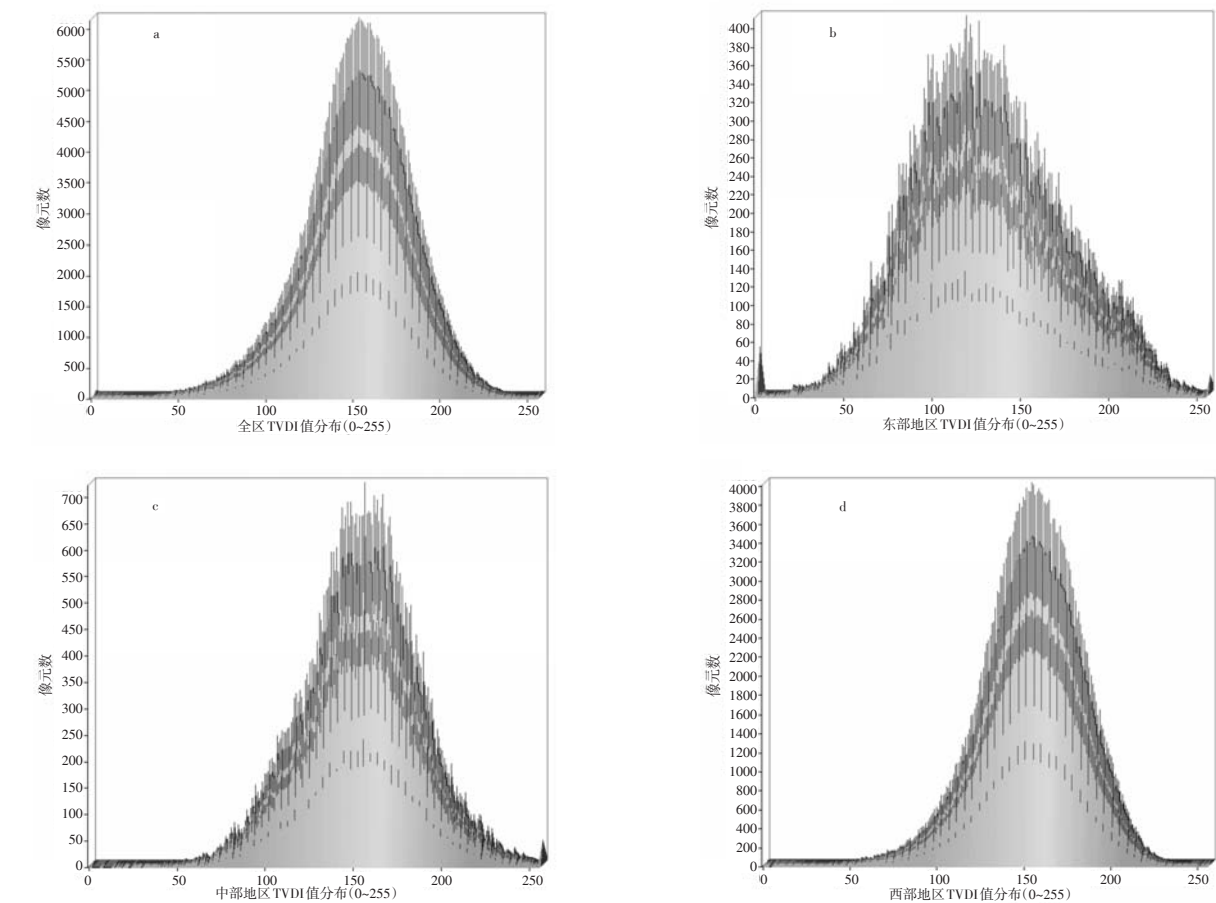


图6 藏北地区 TVDI 值分区统计

Fig.6 Statistic histograms of TVDI value in different parts of northern Tibet

注: 为便于显示和分析,图横坐标 TVDI 值 0~1 范围转换为 0~255

律:藏北全区 TVDI 值呈近似正态分布, TVDI 在 0.6 左右像元数目最多;相比之下,东部地区土壤土壤明显偏湿,直方图为左偏,大部分地区土壤 TVDI 值集中在 0.4 ~ 0.55 范围内,而在 TVDI 值 0.8 左右出现一个小波峰,主要是因为念青唐拉山脉东部(比如、索县的西部)部分沙滩地由于土壤质地及蒸散发较其他地方更强,土壤湿度偏低;中部地区 TVDI 值的直方图分布波峰相对平缓,多集中在 0.55 ~ 0.65 范围内且像元频数近似,即大部分地区的土壤湿度相对正常;西部地区 TVDI 直方图分布与全区相似,峰值稍右移,频数最大值出现在 TVDI 值为 0.63 附近,土壤相对偏旱。

(3) 不同气候区划土壤干湿状况分析

本研究采用的气候区划是郑景云等^[23]利用 1971-2000 年的日气象观测资料对中国气候进行的重新区划的藏北部分,包括昆仑高山亚寒带干旱区 (I 区)、羌塘高原湖盆亚寒带半干旱区(II 区)、那曲高山谷地亚寒带半湿润区(III 区)、和青南高原亚寒

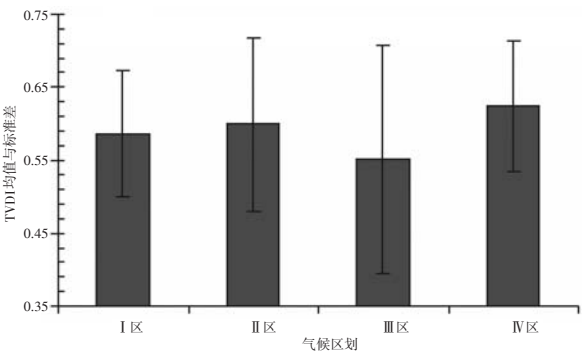


图7 藏北地区不同气候区划内 TVDI 值分布特征

Fig.7 Distribution characters of TVDI in different climate regions 带半干旱区(IV 区)(图 1)。按原气候区划藏北东部地区包括横断山中北部高原温带半湿润区和东南部高原温带湿润区,考虑到面积很小故合并到 III 区。4 个气候区划一方面反映青藏高原几个相对独立的自然地域单元;而从气候指标来看,气温指标划分都属于高原亚寒带,而降水与蒸散发决定的气候干湿状况则存在异同,包括半湿润、半干旱和干旱。

从图 7 可以看出,不同的气候区划内土壤湿度

平均状况和空间分异都具有较大的差异。其中,那曲高山谷地亚寒带半湿润区 TVDI 反映的土壤湿度最高,区划内部的空间差异也最大。这主要与该区域复杂的地形和植被覆盖类型有关,包括念青唐拉山脉主体和怒江上游,境内森林-灌丛-草甸-荒漠草原-裸地-冰雪的地表覆盖垂直地带性表现相当明显。昆仑高山亚寒带干旱区的 TVDI 平均值为 0.58,其土壤湿度反而高于半干旱区的羌塘高原湖盆区和青南高原属于藏北地区的部分地带,主要原因在于 I 区整体海拔较高,临时性冰雪和土壤冻融作用强烈。羌塘高原湖盆亚寒带半干旱区 TVDI 均值为 0.59,区内大部分地区土壤风化作用强烈,土壤湿度低,湖盆与高山交错影响其土壤湿度空间差异也较大。III 区位于唐古拉山山脉北坡,强大的地形作用且处于青藏高原中心,土壤相比其他 3 个地域单元湿度最低,TVDI 均值为 0.62。

(4) 高程对 TVDI 分布的影响

地形作为青藏高原植被、土壤、气候等各方面地域分异的重要控制因素,一方面通过相对高差的巨大山脉、河谷等地域格局影响干、湿气流的走向影响降水、风力等气候差异,从而影响土壤质地、湿度等;另一方面高程控制温度从而影响植被覆盖垂直地带性分布、蒸散发程度以及地表水径流。

图 8a 表示的是藏北地区各像元高程与 TVDI 的散点分布图,TVDI 与高程呈明显的负相关。并且散点分布不难看出 TVDI<0.5 的下半部分收敛性不及上半部分,分析离散点的空间分布,藏北东部及东南部地区部分高程较低的地区土壤湿度偏高,此外存在一些地区尽管海拔较高蒸散作用较弱,但是受降水和土壤质地影响。因此不同气候因素或地域单元控制,土壤湿度和高程并不是简单的线性

关系。对藏北地区按不同高程带分析 TVDI 反映的土壤干湿状况(图 8b),藏北地区高程在 4800~5000 m 的范围内分布最广,4000 m 以下、4000~4200 m、4200~4400 m 高程带内的区域均不足全区的 1%。分析不同高程带内的 TVDI 均值:4400~4600 m 高程带内的地区 TVDI 均值 (0.69) 最高,其表层土壤最为干旱;在低于 4400~4600 m 高程范围的地区,TVDI 值随着高程的增加而降低,即土壤湿度降低;在高于 4400~4600 m 范围的区域,随着高程的增加,TVDI 均值减小,土壤湿度增加。结合高程带的空间位置分析,在高程大约 4500 m 以下的地区主要分布在藏北地区的东南 4 县范围内,植被覆盖较好,降水较丰富,蒸散发并不成为土壤湿度的主要限制因子。越往西部地区,降水越稀少,高程控制的蒸散程度影响土壤干湿状况的越发明显,因此呈现出随着高程增加土壤湿度偏高,在高程大于 5400 m 的地区 TVDI 均值为 0.45。

5 结论及讨论

本研究利用 Terra 卫星的 MODIS 的 EVI 和 LST 数据,提取 TVDI 指数反映藏北地区土壤干湿状况,并基于同步时间内的实地采集数据进行验证,取得较好的效果。并进一步分析藏北地区土壤湿度的空间分布特征:①土壤湿度总体上从东、南部到西北递减,但是这种趋势上叠加了局部地形的影响;②全区 TVDI 值呈正态分布,东部地区偏湿,中部地区多数为正常湿度,而西部 TVDI 直方图分布与全区近似,但偏旱;③从气候区划角度分析,那曲高山谷地亚寒带半湿润区土壤湿度最高,但是其空间内部差异也最大,昆仑高山亚寒带干旱区由于海拔整

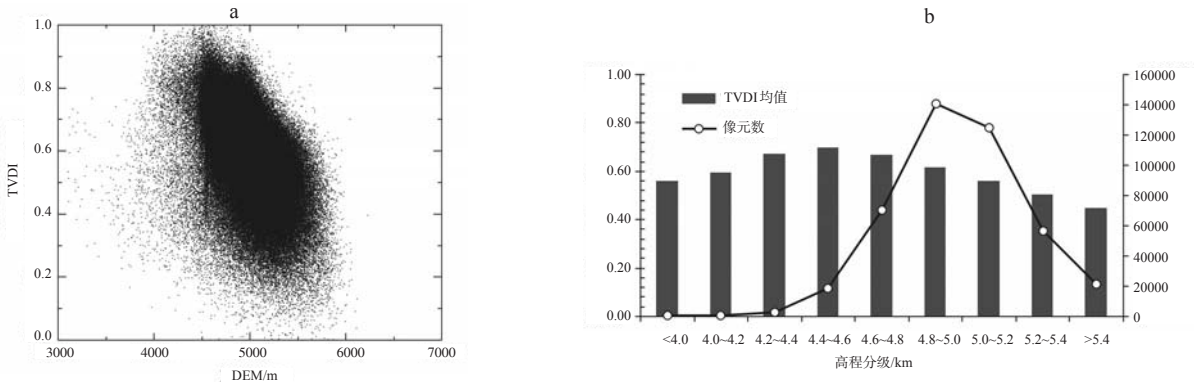


图 8 藏北地区不同高程等级 TVDI 值分布特征

Fig.8 Mean value of TVDI and pixel numbers at different altitudes

体较高,土壤冰雪及冻融作用使其土壤湿度高于半干旱的羌塘高原湖盆区与青南高原区;④在低于大约4500 m高程的地区,降水较多其植被覆盖良好,土壤湿度不受高程控制的温度影响,而在更高海拔的地区,随着高程增加土壤湿度也增加。

但是,根据TVDI方法的原理,其获取土壤干湿信息对于植被覆盖的地区具有较好的效果,但是在植被稀疏或荒漠地区的效果可能不佳。此外,由于藏北地区气象站点极其稀疏且无法获取最近时段的气象数据,因此,无法直接验证土壤湿度空间分布与气温或降水的关系。希望未来进一步研究近年来藏北地区土壤干湿的季节性或年际变化及与植被覆盖、气温和降水等要素的时空相关性。

参考文献

- [1] 吴险峰, 刘昌明. 流域水文模型研究的若干进展. 地理科学进展, 2002, 21(4): 341-348.
- [2] 刘志明, 张柏, 晏明, 等. 土壤水分与干旱遥感研究的进展与趋势. 地球科学进展, 2003, 18(4): 576-583.
- [3] 刘昌明, 孙睿. 水循环的生态学方面: 土壤-植被-大气系统水分能量平衡研究进展. 水科学进展, 1999, 10(3): 251-259.
- [4] 邓辉, 周清波. 土壤水分遥感监测方法进展. 中国农业资源与区划, 2004, 25(3): 46-49.
- [5] 余涛, 田国良. 热惯量法在监测土壤表层水分变化中的研究. 遥感学报, 1997, 1(1): 24-32.
- [6] 隋洪志, 田国良, 李付琴. 农田蒸散双层模型及其在干旱遥感监测中的应用. 遥感学报, 1997, 1(3): 220-224.
- [7] 夏虹, 武建军, 刘雅妮, 等. 中国用遥感方法进行干旱监测的研究进展. 遥感信息, 2005(1): 55-57.
- [8] 孙丽, 陈焕伟, 赵立军. 遥感监测旱情的研究进展. 农业环境科学学报, 2004, 23(1): 202-206.
- [9] Nemani R R, Pierce L, Running S, et al. Developing satellite derived estimates of surface moisture status. Journal of Applied Meteorology, 1993, 32(3): 548-557.
- [10] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(5): 940-948.
- [11] Carlson T N, Gillies R R, Perry E M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetaional cover. Remote Sensing Review, 1994, 9(1-2): 45-59.
- [12] 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.
- [13] Wan Z M, Wang P X, Li X W. Using MODIS land surface temperature and Normalized Difference Vegetation Index products for monitoring drought in the southern Great Plains. USA. International Journal of Remote Sensing, 2003, 25(1): 1-12.
- [14] Gillies R R, Carlson T N, Kustas W P. A Verification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(15): 3145-3166.
- [15] Goetz S J. Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(1): 71-94.
- [16] Goward S N, Xue Y, Czajkowski K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements: An exploration with the simplified simple biosphere model. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(223): 225 - 242.
- [17] 齐述华, 王长耀, 牛铮. 利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究. 遥感学报, 2003, 7(5): 420-427.
- [18] 李正国, 王仰麟, 吴健生, 等. 基于植被/温度特征的黄土高原地表水分季节变化. 生态学报, 2007, 27(11): 4563-4575.
- [19] 杨曦, 武建军, 闫峰, 等. 基于地表温度-植被指数特征空间的区域土壤干湿状况. 生态学报, 2009, 29(3): 1205-1216.
- [20] 甘肃草原生态研究所草地资源室和西藏自治区那曲地区畜牧局. 西藏那曲地区草地畜牧业资源. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991: 12-68.
- [21] 闫峰, 王艳娇. 基于Ts-EVI特征空间的土壤水分估算. 生态学报, 2009, 29(9): 4884-4891.
- [22] 刘庆生, 李集生, 刘高焕, 等. Hydra土壤测试仪测定现代黄河三角洲的土壤水分与盐分试验. 现代科技, 2009, 15(1): 161-162.
- [23] 郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 中国气候区划新方案. 地理学报, 2010, 65(1): 3-12.

The Spatial Pattern of Soil Moisture in Northern Tibet Based on TVDI Method

SSONG Chunqiao^{1,2,3}, YOU Songcai⁴, LIU Gaohuan¹, KE Linghong^{1,2}, ZHONG Xinke^{1,2}

- (1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, State Key Lab of Resources and Environmental Information System, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China;
- 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China;
- 3. The Department of Geography and Resource Management, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong;
- 4. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture; Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing, 100081, China)

Abstract: Using enhanced vegetation index (EVI) and land surface temperature (LST) dataset derived from TERRA/MODIS synthetic products MOD13 A2 (16-day composite, DOY 209 in 2010) and MOD11 A2 (8-day composite, DOY 209 and 217 in 2010), the LST-EVI two-dimensional characteristic space was constructed, and then TVDI (temperature-vegetation drought index) was extracted to indicate the top-soil moisture of northern Tibet. Furthermore, the simulated soil moisture was verified by synchronously measured data in the field. The two groups of data showed a strong relationship and the correlation coefficient got through the 0.05 significance level. Then the spatial pattern and heterogeneity of soil moisture in the studied area were further analyzed, and the results showed: (1) the TVDI values of pixels in northern Tibet proved to have a statistically normal distribution, and the soil moisture in eastern region, central region and western region respectively showed wet, normal and dry situations; (2) evident difference in soil moisture existed in different climatic zones, and the soil moisture in the mountain and valley-in-valley structured Nagqu sub-arctic and sub-humid zone was the highest and that in southern Qinghai sub arctic and semiarid zone was the lowest; (3) the spatial distribution of soil moisture in the area was obviously affected by the altitude. The soil moisture in the region below 4500 m showed a negative correlation with the altitude and the correlation was positive in the region higher than 4500 m.

Key words: TVDI; northern Tibetan Plateau; soil moisture; MODIS; spatial pattern

本文引用格式:

宋春桥, 游松财, 刘高焕, 等. 基于TVDI的藏北地区土壤湿度空间格局. 地理科学进展, 2011, 30(5): 569-576.