

遥感模型支持下的精河流域绿洲表层 土壤水分时空分布特征

刘 婕¹, 王明霞¹, 毋兆鹏^{1,2}

(1. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054;

2. 新疆师范大学 干旱区湖泊环境与资源新疆维吾尔自治区重点实验室, 乌鲁木齐 830054)

摘 要:土壤水分对干旱区气候变化、生态环境稳定、绿洲农业发展有着重要的影响作用。以新疆精河流域绿洲为研究区,基于 Landsat TM 和 ETM+ 影像,借助修正后的温度植被干旱指数(TVDIm),进而反演了研究区 2002 年和 2011 年春、夏、秋 3 季的表层土壤水分。结果表明:(1) 野外同步实测数据精度验证 R^2 值为 0.800 2, TVDIm 能够较好地反映绿洲土壤水分分布状况;(2) 研究区表层土壤水分的季节性变化明显,即秋季>夏季>春季,近 10 年间土壤水分总体呈趋湿特征;(3) 研究区绿洲内部的土壤水分状况明显优于过渡带及天然荒漠区;(4) 土地利用叠加分析指示,人类活动对土壤水分的空间分布影响强烈。

关键词:遥感; 土壤水分; 时空分布; 精河流域

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)03-0095-05

Spatiotemporal Distribution Characteristics of Soil Moisture in Surface Layer of Oasis in Jinghe Basin Under the Support of Remote Sensing Model

LIU Jie¹, WANG Mingxia¹, WU Zhaopeng^{1,2}

(1. College of Geography and Tourism Science, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China;

2. Municipal Key Laboratory of Arid Lake Environment and Resources, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

Abstract: Soil moisture has an important influence on the change of climate, the stability of ecological environment and the development of oasis farming in the arid area. Based on the Landsat TM and ETM+ images, we selected the Oasis of Jinghe Basin as the study site and investigated the moisture changes of the topsoil in spring, summer and autumn during the period from 2002 and 2011 using the modified Temperature-Vegetation Dryness Index (TVDIm). The findings are listed as follows: (1) By comparing and measuring, we found that the R^2 value of precision is 0.800 2, which means that TVDIm can better reflect the distribution of soil moisture in oasis; (2) The seasonal changes of moisture in the topsoil of the study area are significant, that is to say the moisture decreased in the order: autumn>summer>spring, and the water content is becoming higher in recent 10 years; (3) The condition of soil moisture in the inland of the study area is better than that in the transition belts and natural deserts; (4) The overlay analysis of land use indicated that human activities had the strong influence on the spatial distribution of soil moisture.

Keywords: remote sensing; soil moisture; spatiotemporal distribution; Jinghe Basin

新疆光热丰富,降水稀少,是典型的干旱区,形成了以沙漠、半沙漠、戈壁、草原、森林以及绿洲为主的自然景观和绿洲经济。随着全球变化研究的深入和发展,人类生存与发展对土地的开发利用以及土地覆盖变化被认为是全球环境变化的重要组成部分和主

要原因^[1-2]。区域土壤水分检测不但对改善区域及全球气候的研究具有重要意义,而且能够有效地监控土地退化和干旱状况。大量学者的研究阐明了土壤水分变化对环境生态和气候变化响应的重要性,以及农作物生长发育和不同时期土壤水分状况的关系,并且

收稿日期:2015-06-02

修回日期:2015-06-18

资助项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2013211A022);新疆师范大学研究生科技创新项目(XSY201502006);新疆师范大学地理学博士点支撑学科(XJNU-DL-201515);新疆维吾尔自治区重点实验室“新疆干旱区湖泊环境与资源实验室”基金(XJDX0909201206)

第一作者:刘婕(1992—),女,河南驻马店人,硕士研究生,研究方向为资源环境地理信息系统。E-mail:liujie_ixj@163.com

通信作者:毋兆鹏(1976—),男,陕西西安人,博士,教授,主要从事 3S 技术与绿洲资源开发研究。E-mail:wuzhaopengxj@sina.com

有学者建立了土壤干旱预警模型,更好地监测土壤水分变化对干旱区农业的影响^[3-6]。本文通过对精河流域绿洲土壤水分状况的研究,不仅可以了解预测研究区土壤水分的干湿程度,也可以有效地掌握地表水分的运移状态,对干旱绿洲的农业活动具有一定的指导作用,也为改善小尺度区域的气候,以及改善精河流域绿洲生态环境打下基础。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

研究区包含整个艾比湖湖区和精河流域绿洲,总面积达 2 572.30 km²,地理位置为 82°40′—83°10′E, 44°20′—44°50′N,自南向北呈扇状坡面,中部为冲积—洪积平原,北部为艾比湖(图 1)。研究区地处亚欧大陆腹地,远离海洋,干燥少雨,属典型的温带大陆性干旱气候,区内降水量由西向东递增^[7],年平均降水量约为 251.9 mm,年平均气温 7.8℃,年平均蒸发量 2 447.1 mm^[8]。

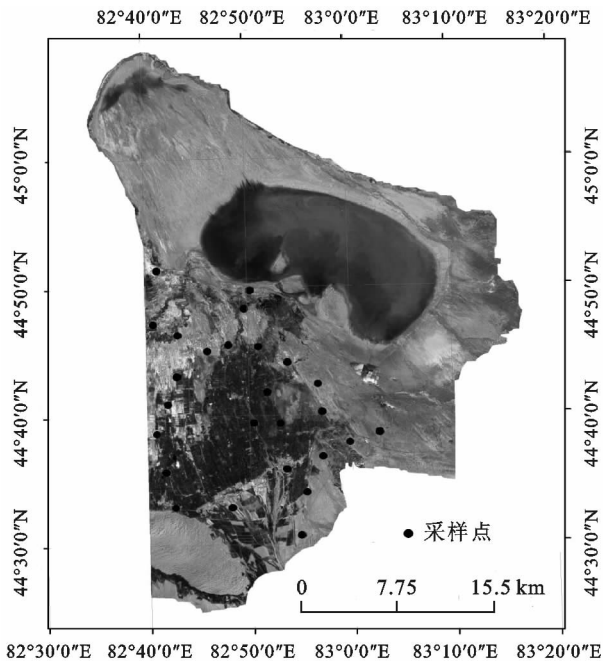


图 1 研究区及土壤水分样点分布

1.2 数据及预处理

本研究所用遥感数据主要来自美国陆地卫星 Landsat TM 和 ETM+ 影像共 6 景。其中, Landsat TM 包括 2002 年 5 月 7 日(春季)、2002 年 7 月 10 日(夏季)和 2002 年 9 月 28 日(秋季); Landsat ETM+ 包括 2011 年 5 月 24 日(春季)、2011 年 7 月 11 日(夏季)和 2011 年 9 月 13 日(秋季)。所有影像云量均小于 5%,经过辐射定标、几何纠正及大气校正。此外, Landsat ETM+ 于 1999 年 4 月 15 日发射升空后, 2003 年因校正器故障,使得影像数据出现部分重叠

和丢失。本文主要运用 ALR 方法,即通过建立两幅图像灰度值的回归方程,将填充影像的色调向待修复影像靠近,完成影像修复^[9],能够满足反演需求。

为了分析修正后的温度植被干旱指数(TVDIm)与研究区域降水量、气温的关系,本文选取了 2002 年和 2011 年中 4—10 月的月平均温度,气象数据来源于精河气象站,多年月平均降水量数据来自于相关文献^[8]。

1.3 土壤水分反演算法

Sandholt 等^[10]在研究遥感反演土壤湿度的过程中,基于 Ts-NDVI 特征空间与土壤湿度的等值线关系,提出了可以表示土壤相对湿度状况的温度植被干旱指数(TVDI)。TVDI 是由 Ts-NDVI 特征空间得到的比值,计算公式可以表示为:

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

式中: $T_{s_{min}}$ ——最小地表温度,对应的是湿边; T_s ——任意像元的地表温度; $T_{s_{max}}$ ——指定像元 NDVI 对应的最高地表温度,对应干边; $T_{s_{min}}$, $T_{s_{max}}$ 的取值可以通过对 Ts-NDVI 特征空间的干边及湿边进行模拟得到:

$$T_{s_{min}} = a_2 + b_2 NDVI \quad (2)$$

$$T_{s_{max}} = a_1 + b_1 NDVI \quad (3)$$

式中: a_1 , b_1 ——干边拟合方程的系数; a_2 , b_2 ——湿边拟合方程的系数。

由于 NDVI 在植被覆盖度较高的区域容易饱和,导致对高植被覆盖区敏感性较低^[11],运用 TVDI 法反演湿度时会对结果造成一定的误差。改进型土壤调整植被指数(Modified Soil-Adjusted Vegetation Index, MSAVI)与归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)相比较,MSAVI 修正了 NDVI 在植被密闭区或者低植被覆盖区估测的误差,增加了依据实际情况选定的土壤调节系数,可以较好地消除或减弱土壤背景对植被指数的影响,提高计算的精度。

$$MSAVI = [(2\rho_{NIR} + 1) - \sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_R)}] / 2 \quad (4)$$

式中: ρ_{NIR} ——近红外波段的反射率; ρ_R ——可见光红色波段的反射率。

因此本文采用改进型土壤调整植被指数 MSAVI 替代 NDVI 参与计算,构建 Ts-MSAVI 特征空间,减小因植被指数计算造成的误差。结合公式(1)——(4)得到最终的 TVDIm 计算公式如下:

$$TVDIm = \frac{T_s - (a_2 + b_2 MSAVI)}{(a_1 + b_1 MSAVI) - (a_2 + b_2 MSAVI)} \quad (5)$$

TVDIm=0 表示土壤水分最大,地表最湿润状况,即湿边; TVDIm=1 表示土壤水分最小,地表最

干旱的状况,即干边。TVDIm 的取值范围为 0~1, TVDIm 值表示土壤的土壤水分状况,TVDIm 值越大,对应的土壤水分越低。

2 结果与分析

2.1 精河流域绿洲土壤湿度反演结果验证

为验证反演结果,在研究区内选取典型 26 个样点,与卫星同步对土壤表层(0—10 cm)水分进行实地监测。监测所用仪器为瑞士产 MSR145 土壤自动记录温湿仪,可连续自动记录 2 年数据。本研究在卫星过境前 10 d 埋入,卫星过境后 5 d 取出。所有观测样点均采用 GPS 进行定位,研究区土壤监测点分布如图 1 所示。本研究反演所用 TM 影像数据空间分辨率为 30 m,而野外观测点是根据土地利用类型进行布设,二者虽在空间上难以对应,但由于研究区地势平坦,因此可以尝试使用点上采集的土壤的含水量数据来验证区域面上的数据。TVDIm 和土壤含水量,经回归分析 t 检验($\alpha=0.05$),得出线性回归方程达到显著。土壤含水量为横坐标,以 TVDIm 值为纵坐标,对 TVDIm 和土壤含水量的相关性进行线性拟合。TVDIm 与实测土壤含水量的拟合结果,如图 2 所示。TVDIm 与表层(0—10 cm)土壤含水量之间表现出显著的相关性,随着土壤含水量增大,TVDIm 呈现减小趋势。由于整个研究区的土壤含水量较低,散点集中在土壤湿度低值区域。对 TVDIm 和土壤含水量的线性拟合结果, R^2 值为 0.800 2,说明 TVDIm 能够反映地表土壤水分分布状况,作为指示地表土壤湿度的指标比较合理。

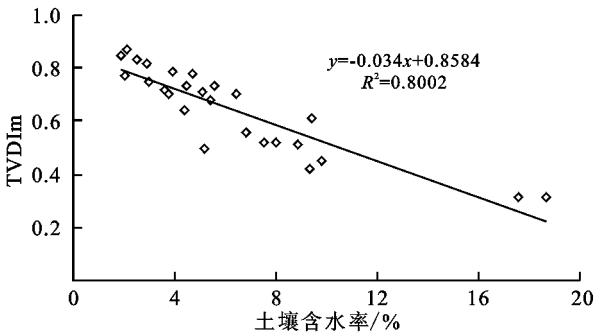


图 2 土壤含水率与 TVDIm 的相关性

2.2 精河流域绿洲土壤湿度分布特征分析

在遥感图像处理软件的支持下,根据上述 TVDIm 模型和方法,利用 Landsat TM 影像,得到 2002 年和 2011 年春、夏、秋 3 季的土壤水分状况反演结果。参照 TVDI 指数反演土壤干旱等级划分标准^[12],将研究区 TVDIm 划分为 5 个等级:极湿润($0 \leq \text{TVDIm} < 0.2$)、湿润($0.2 \leq \text{TVDIm} < 0.4$)、无旱($0.4 \leq \text{TVDIm} < 0.6$)、干旱($0.6 \leq \text{TVDIm} < 0.8$)、极干旱($0.8 \leq \text{TVDIm} \leq 1.0$)。

在研究中通过 TVDI 土壤水分反演模型的划分标准对研究区 TVDIm 进行等级划分,结果如图 3 所示。

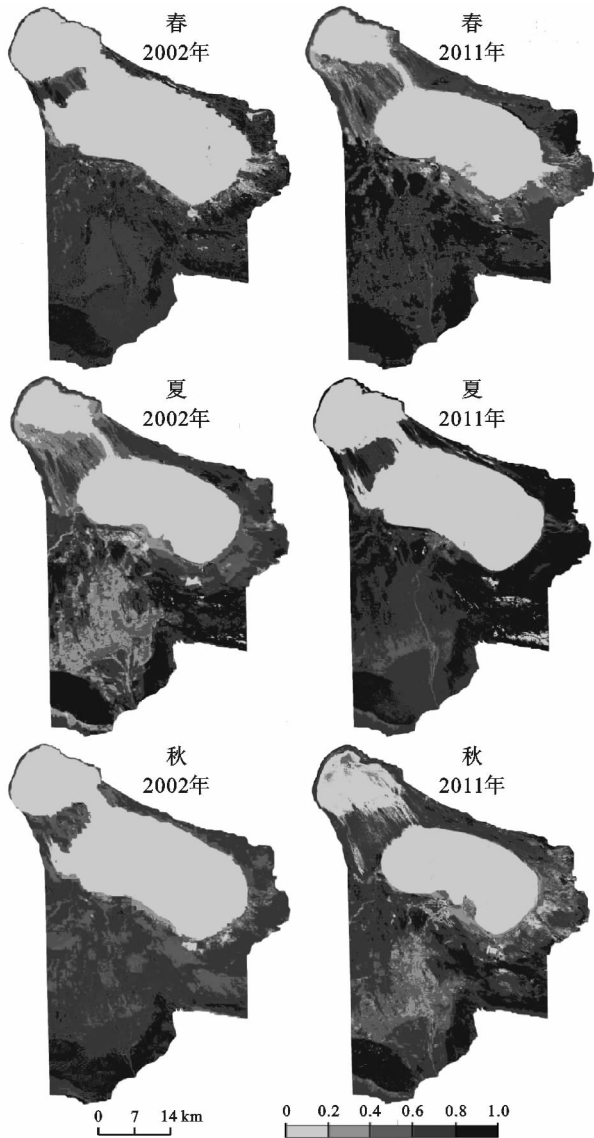


图 3 精河流域土壤湿度反演结果分级

2.2.1 精河流域绿洲土壤湿度时间分布特征 由图 3 可以看出,精河流域绿洲的土壤水分季节特征明显,呈单峰型变化。从春季开始,TVDIm 值开始明显升高,表明土壤水分持续下降,连续最大的 TVDIm 值出现在夏季(6—8 月),反映出夏季土壤水分相对较低,进入秋季 TVDIm 值则出现迅速减少趋势,说明研究区土壤水分呈现回升趋势。从空间分布特征来看,春季,艾比湖湖区南部及西南部有部分呈斑块状区域土壤水分相对较高,其余区域土壤水分状况均为干旱和极干旱。夏季,土壤水分较低的干旱区域呈片状向四周扩展,研究区除精河沿河区、内冲积—洪积平原及绿洲耕作区土壤水分状况为无旱外,其余地区为不同程度的干旱、极干旱。秋季,研究区除常年较干的南部、东南部外,整体土壤水分状况开始大范围好转。

对精河流域过去近 50 年的年内降水研究表明精河流域的年内降水分配极不均匀,具有明显的集中性^[8]。将本研究的 TVDI_{Im} 数值与李加强等^[8]多年平均降水量的月份分配数值叠加分析得出,研究区绿洲的土壤水分状况的季节性变化与多年降水量呈明显相关性(图 4),这似乎与“降水量增长则 TVDI_{Im} 值

应降低,即土壤水分升高”的常规性结论相悖。事实上这是由于研究区的特殊自然环境特点造成的。精河流域多年平均蒸发量 2 447.1 mm,而多年平均降水量只有 251.9 mm,相差近 10 倍,由此也表明,尽管降水量对土壤水分补充有一定影响,但不如其他气象因子对土壤水分变化的影响强烈^[13]。

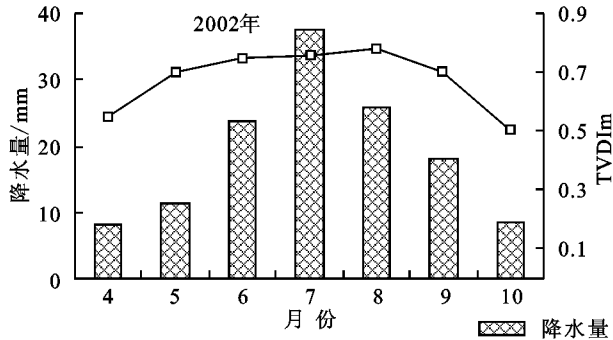
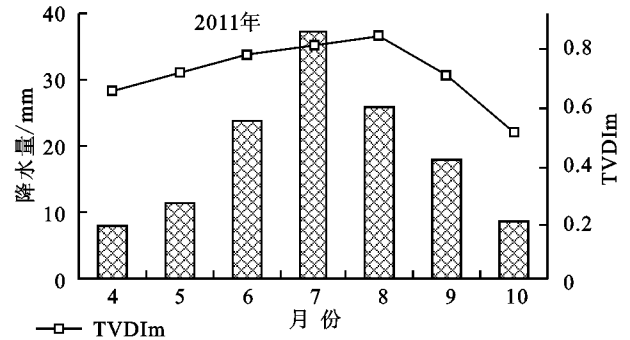


图 4 TVDI_{Im} 与月平均降水量的关系曲线



进一步将 TVDI_{Im} 数值与年内逐月气温叠加分析,二者的趋势一致性同样十分明显(图 5)。这说明较高的气温会大大增加土壤蒸散发从而抵消降水对土壤水分

的补给^[14]。因此,对精河流域绿洲而言,在干旱区的大背景下,气温升高导致蒸发量增大的作用明显大于降水量对土壤水分的补给作用,其影响起主导作用^[7,13]。

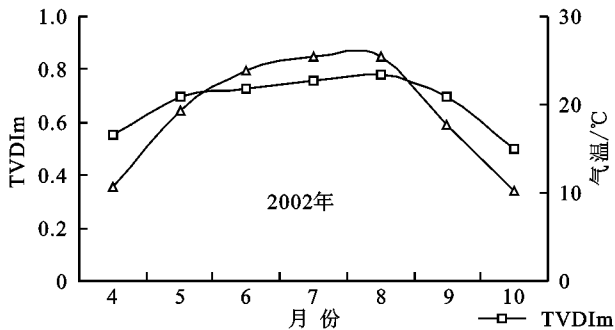
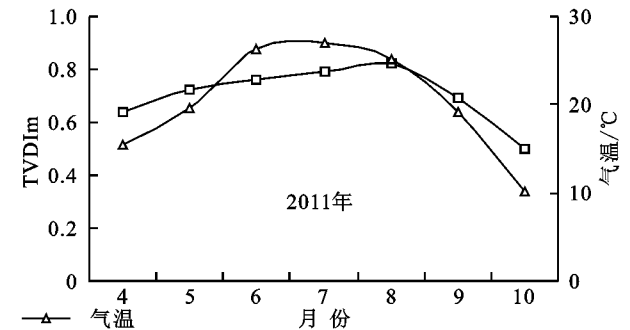


图 5 TVDI_{Im} 与月平均气温的关系曲线



随着全球气候变暖,将引起蒸散发的增加,导致土壤干旱的加剧^[8]。然而在这样的大背景下,研究区 2011 年土壤水分状况与 2002 年相比较好。这是因为艾比湖湿地 2007 年由自治区级自然保护区晋升为国家级自然保护区。研究区内退耕还林、退耕还湿、引水治沙、引水治草等的保护措施逐步实施,保护力度的逐步加强,使得土壤水分相对较高。

2.2.2 精河流域绿洲土壤湿度空间分布特征 尽管如此,由于人文作用会影响地表能量平衡,改变地表结构及土壤水分的分布,因此,研究区人文活动影响的叠加尤其是土地利用状态,仍使地表土壤水分的状况出现了较大的空间差异。本研究利用 TM 影像数据提取了 2002 年和 2011 年的土地利用数据(图 6),并将 TVDI_{Im} 的月均值图像与土地利用分类图进行叠加分析,得到不同土地利用条件下的土壤水分分布状况(图 7)。

结果表明:耕地月平均 TVDI_{Im} 为 0.65~0.85,而草地和林地月平均 TVDI_{Im} 为 0.6~0.75,城镇建筑用地月平均 TVDI_{Im} 为 0.75~0.8,未利用地月平

均 TVDI_{Im} 为 0.8~0.9,土壤水分与土地利用之间关系密切(图 7)。

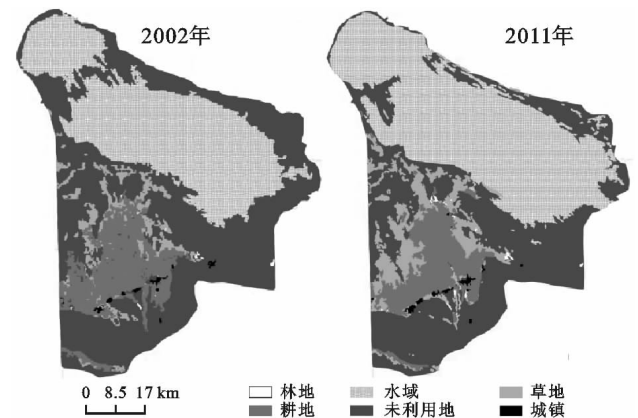


图 6 精河流域绿洲土地利用状况

耕地区和草地区的 TVDI_{Im} 月均值在 4—7 月逐渐升高,8 月稳定在 0.8 左右,表明植物处于生长需水量较大的时期,9—10 月 TVDI_{Im} 减小,土壤水分增加,表明植物已过生长需水期或农作物已收割、植物已枯萎,耗水量下降。

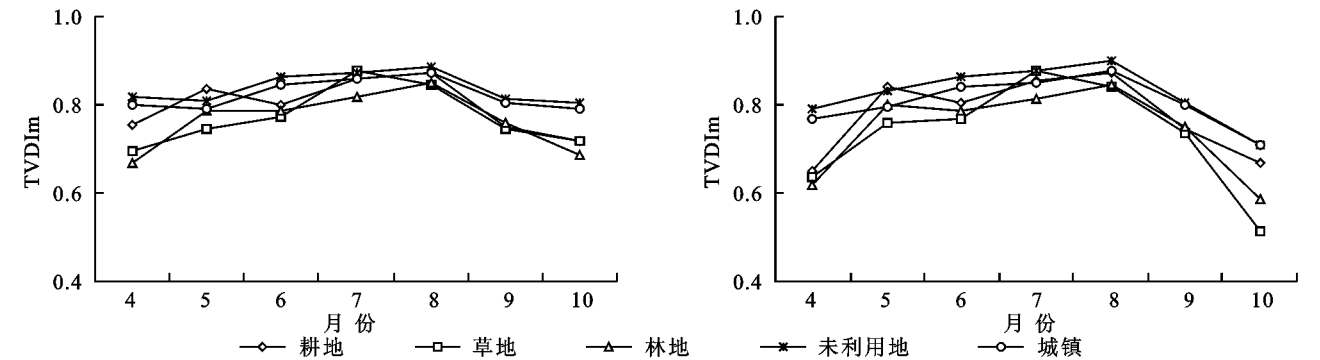


图 7 不同土地利用类型 TVDI_m 变化

林地区的 TVDI_m 月均值,4—8 月为 0.65~0.82,与草地区 TVDI_m 值相比增加趋势平稳,则是因为一年生草本与多年生木本需水量变化情况不同。

城镇建筑用地的 TVDI_m 月均值为 0.75~0.8,未利用地的 TVDI_m 月均值为 0.8~0.9,且后者 TVDI_m 值整体比前者高,表明土壤水分极少,但二者时间序列的土壤水分分布趋势基本一致。

从研究区整体来看,耕地、草地、林地和城镇用地的 TVDI_m 值明显低于未利用地,这也表明人类活动对土壤水分的分布情况有很大的影响。

3 结论

(1) 利用 Ts-MSAVI 模型能够反映地表土壤水分分布状况,可以作为有效指示地表土壤水分状况的指标。

(2) 精河流域绿洲的土壤水分季节特征变化明显。春季气温升高,土壤水分降低,随着夏季的到来,温度持续升高,蒸发量大于降水量,研究区土壤水分普遍下降。秋季降水量减少,气温降低,蒸发量减少,土壤干旱状况得到缓解。在干旱区的大背景下,相对于降水量而言,气温升高导致的蒸发量增大是影响土壤水分状况的主导因素。

(3) 虽然耕地、草地和林地这 3 种土地利用类型的土壤水分在年内的变化趋势具有较好的一致性,但不同土地利用类型的土壤在不同的时期,由于人类活动的影响,其 TVDI_m 存在差异。对于生态环境极其脆弱的干旱区绿洲而言,在人口增长带来对耕地需求增加的背景下,如若不提高农田管理质量而导致大面积撂荒,就会极易引起土地盐渍化或荒漠化,对当地人民的生存和发展造成潜在威胁,继而带来一系列生产经济问题。因此,在合理规划土地利用,注重经济效益的同时,应继续推行退耕还林、退耕还草政策。

参考文献:

[1] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域:土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J]. 地理学报,1996,51(6):

553-558.
[2] Nunes C, Auge J L. Land-use and Land-cover Change (LUCC):Implementation strategy[M]. 1999.
[3] 蒋冲,王飞,穆兴民,等. 黄土高原农田土壤湿度演变及其与气候变化的响应关系[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(3):234-243.
[4] 王晓贤,张学培. 晋西黄土高原土壤水分垂直变化规律及生态影响[J]. 水土保持研究,2009,16(2):200-204.
[5] 张哲,焦峰,梁宁霞,等. 延河流域不同植被带土地利用方式的土壤水分分析评价[J]. 水土保持研究,2014,21(4):74-79.
[6] 蒲金涌,姚晓红,辛昌业,等. 甘肃黄土高原土壤水分预测及早情预警模型研究[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(3):254-258.
[7] 王范霞,毋兆鹏. 近 40 a 来精河流域绿洲土地利用/土地覆被时空动态演变[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(2):150-155.
[8] 李加强,陈亚宁,李卫红,等. 天山北坡中小河川降水与径流变化特征:以精河为例[J]. 干旱区地理,2010,33(4):615-622.
[9] 寿敬文,陈雪,马建文,等. 采用 ALR 算法对 Landsat-7 图像缺行修复的应用研究[J]. 光电子·激光,2006,17(3):368-371.
[10] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment,2002,79(23):213-224.
[11] Qi J, Huete A R, Moran M S,et al. Interpretation of vegetation indices derived from multi-temporal SPOT images[J]. Remote Sensing of Environment,1993,49(44):89-90.
[12] 姚春生,张增祥,汪潇. 使用温度植被干旱指数法(TVDI)反演新疆土壤湿度[J]. 遥感技术与应用,2004,19(6):473-478.
[13] 王磊,文军,韦志刚,等. 中国西北区西部土壤湿度及其气候响应[J]. 高原气象,2008,27(6):1257-1266.
[14] 苏明峰,王会军. 全球变暖背景下中国夏季表面气温与土壤湿度的年代际共变率[J]. 科学通报,2007,52(8):965-971.