

# 基于 TVDI 的艾比湖地区土壤水分时空变化分析

曹雷<sup>1,2</sup>, 丁建丽<sup>1,2</sup>, 牛增懿<sup>1,2</sup>

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

**摘要:**以艾比湖湿地为研究区,利用 2003 年 5 月和 2013 年 5 月 Landsat 遥感影像,提取了地表温度( $T_s$ )和植被指数(NDVI)反演温度植被干旱指数(TVDI),并构建特征空间,分析了土壤水分的时空变化。试验结果表明:TVDI 可有效反演区域土壤水分,且精度较高;自 2003—2013 年共 10 a 的时间跨度下,艾比湖地区土壤水分空间分布由湖区向周边地区呈减少趋势;湿润、正常和轻旱面积减少,干旱和重旱面积增加,呈现“两增三减”的趋势。区域土壤水分分布情况不容乐观,仍需加强当地水资源管理,以保障区域生态系统的正常运转。

**关键词:**温度植被干旱指数(TVDI); 土壤水分; 艾比湖; 时空变化

中图分类号: TP79; S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)03-0043-05

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2016.03.008

## Analysis of Spatiotemporal Change of Soil Moisture of the Ebinur Lake Area Based on TVDI

CAO Lei<sup>1,2</sup>, DING Jianli<sup>1,2</sup>, NIU Zengyi<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecosystem, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** Ebinur lake area was taken as a study area in this study. Landsat satellite imageries taken in May of 2003 and May of 2013 were used as the main data sources to extract surface temperature ( $T_s$ ) and vegetation index (NDVI) in order to inverse the temperature vegetation drought index (TVDI), construct feature space and analyze spatiotemporal change of soil moisture. The results showed that TVDI could effectively inverse the regional soil moisture with high precision; from 2003 to 2013, a total of 10-year span, the soil moisture spatial distribution from the lake to surrounding areas showed a decreasing trend in Ebinur Lake area; wet, normal and light drought areas were reducing, drought and heavy drought areas increased and showed the tendency of ‘two-increase and three-decrease’. Regional distribution of soil moisture is not optimistic. The local water resources management need to be strengthened in order to ensure the normal operation of regional ecological system.

**Keywords:** temperature vegetation drought index (TVDI); soil moisture; Ebinur Lake; spatiotemporal change

土壤水分是陆地和大气能量交换过程中的重要因子,是水循环、能量循环和生物地球化学循环中的基本组成部分<sup>[1]</sup>,同时也是制约植被正常生长的重要生态限制因子之一。自 20 世纪 60 年代末就开始利用遥感技术来监测土壤水分,并取得了一定的研究成果。基于遥感监测土壤水分的方法主要分为光学遥感、主动微波、被动微波 3 类<sup>[2]</sup>。而光学遥感主要利用土壤表面光谱反射特性、土壤表面发射率及表面温度来估算

土壤水分,其空间分辨率高,可供选择的卫星传感器多,并提供高光谱数据<sup>[2]</sup>。目前,国内外许多学者利用温度植被干旱指数构建特征空间,用于土壤水分相关研究,并取得了一定成果。温度植被干旱指数(Temperature Vegetation Drought Index, TVDI)耦合了地表温度( $T_s$ )和植被指数(NDVI)信息,通过对  $T_s$ -NDVI 特征空间的变化特征进行分析,以知晓土壤水分状况,从而实现农业旱情遥感监测的有效利

收稿日期:2015-05-28

修回日期:2015-06-09

资助项目:国家自然科学基金重点项目(41130531);新疆维吾尔自治区青年科技创新人才培养工程(2013711014);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-1075)

第一作者:曹雷(1992—),女,四川南充人,硕士,研究方向为干旱区资源遥感研究。E-mail:clhyesa@163.com

通信作者:丁建丽(1974—),男,山东成武人,博士,教授,主要从事干旱区资源遥感研究。E-mail:watarid@xju.edu.cn

用<sup>[3]</sup>。Pohn 等<sup>[4]</sup>最早将热模型应用于地质研究中,推动了土壤水分遥感监测方法的研究。Gillies 等<sup>[5]</sup>应用土壤、植被和大气传输模型对土壤湿度进行模拟,并结合通过遥感影像获得的  $T_s$  和 NDVI 作图,进而得到一系列不同的土壤湿度的等值线。Sandholt 等<sup>[6]</sup>基于植被指数和地表温度的关系,提出了 TVDI 估测土壤表层水分状况。Goward 等<sup>[7]</sup>研究影响  $T_s$  与 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,但其结果与实际情况存在较大差异。张仁华<sup>[8]</sup>提出了一个考虑地表显热通量及潜热通量的热惯量模式,用以反演土壤水分。Wu 等<sup>[9]</sup>应用 TM 资料,反演 NDVI、修正土壤调整植被指数 MSAVI 和  $T_s$ ,采用 TVDI 研究了区域土壤水分。张喆等<sup>[10]</sup>针对植被指数对植被状况的敏感性,得出 TVDI 在不同季节下针对不同植被覆盖情况,土壤水分的反演效果不同。

艾比湖地区的土壤水分状况变化是新疆天山北坡乃至全国的土壤水分和农业旱情监测的重要方向。故本文以 2003 年和 2013 年艾比湖流域的 Landsat 遥感影像为基础,利用 TVDI 对其研究区旱情进行分级统计,实现大尺度土壤水分遥感反演,进而分析其土壤水分时空变化特征,为当地政府决策部门的旱情遥感监测提供参考依据。

## 1 研究区概况与研究数据

### 1.1 研究区概况

艾比湖(图 1)位于新疆维吾尔自治区的西北部,准噶尔盆地西南方向,地理坐标  $44^{\circ}22' - 45^{\circ}07'N$ ,  $82^{\circ}07' - 83^{\circ}55'E$ 。艾比湖呈浅碟状,具有典型干旱区湖泊形态特征,它的西北部是著名的风口——阿拉山口<sup>[11]</sup>。夏季降水稀少,冬季干燥寒冷,年平均气温为  $6.6 \sim 7.8^{\circ}C$ ,多年平均降水量为  $116.0 \sim 169.2$  mm<sup>[12]</sup>。研究区常见植物群落有胡杨群落、梭梭群落、刚毛柽柳群落、多枝柽柳群落、大果白刺群落、铃铛刺群落、盐节木群落、芦苇群落等<sup>[13]</sup>。国家级自然保护区艾比湖湿地是荒漠生态系统的典型代表<sup>[14]</sup>,被列入《中国重要湿地名录》,还被伊朗《拉姆萨公约》确定为国际重要湿地<sup>[15]</sup>,对该地区及整体天山北坡的绿洲和植被的正常生长具有重要的生态屏障作用。

### 1.2 数据源

通过“地理空间数据云”平台获取 2003 年 5 月 26 日 Landsat 7 ETM+ 和 2013 年 5 月 29 日 Landsat 8 OLI 遥感影像数据,空间分辨率为 30 m。经在“中国气象网”查阅,两期影像均晴朗无云、天气状况良好。利用 ENVI 4.8 软件对两期影像进行预处理,主要包括采用 FLAASH 模型进行辐射校正、大气校

正、几何校正和裁剪等,使得误差在 0.5 个像元之内,精度符合研究标准。本研究于 2013 年 5 月 20—30 日,共采集 138 个野外土壤样品,采用烘干法来测定土壤水分。

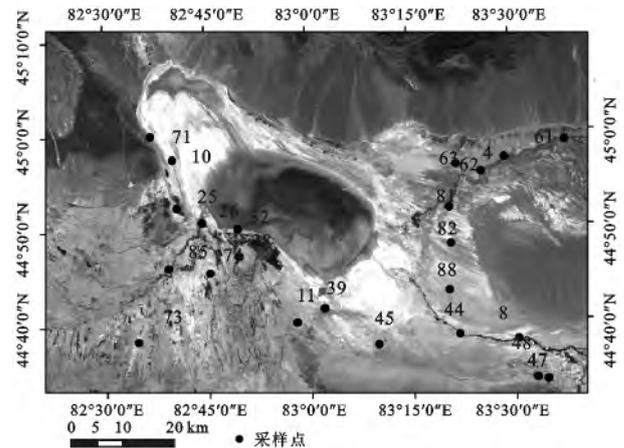


图 1 艾比湖采样点

## 2 研究方法

### 2.1 植被指数

植被指数是利用卫星不同波段探测数据组合而成,能反映植物生长状况的指数。归一化植被指数具体计算公式如下:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (1)$$

式中: NIR——近红外波段的像元亮度值; R——红波段的像元亮度值。

### 2.2 地表温度

2.2.1 Landsat 8 影像地表温度劈窗算法 由于 Landsat 8 有 2 个热红外波段,数据量大,理论上更加完善、严密,精度更高,故采用劈窗算法来反演  $T_s$ 。劈窗算法的主要思想是利用 2 个通道对水汽吸收和比辐射率的差异分别建立方程,求解方程组即可获得  $T_s$ 。本研究利用覃志豪等<sup>[16]</sup>提出的劈窗算法计算  $T_s$ ,公式如下:

$$T_s = A_0 + A_1 T_{10} - A_2 T_{11} \quad (2)$$

式中:  $T_s$ ——地表温度;  $T_{10}$ ,  $T_{11}$ ——Landsat 8 第 10, 11 通道的亮温;  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ——系数。

2.2.2 Landsat 7 影像地表温度辐射传输方程 在获取温度为  $T_s$  的黑体在热红外波段的辐射亮度后,根据普朗克公式的反函数,求得地表真实温度  $T_s$ ,本研究利用毛克彪等<sup>[17]</sup>提出的辐射传输方程计算  $T_s$ ,公式如下:

$$T_s = K_2 / \ln[K_1 / B(T_s) + 1] \quad (3)$$

式中:  $B(T_s)$ ——对于 Landsat 7 的 ETM+, 是温度为  $T_s$  的黑体辐射亮度,  $K_1$ ,  $K_2$ ——传感器的定标常数,  $K_1 = 666.09$  W/( $m^2 \cdot sr \cdot \mu m$ ),  $K_2 = 1282.71$  K。

### 2.3 温度植被干旱指数法(TVDI)

Sandholt 等<sup>[6]</sup>利用简化的 NDVI- $T_s$  特征空间提出 TVDI,而温度植被干旱指数是利用  $T_s$ -NDVI 特征空间提取的水分胁迫指标来估算陆面表层土壤水分的一种方法<sup>[18]</sup>。计算公式如下:

$$TVDI = \frac{T_s - T_{smin}}{T_{smax} - T_{smin}} \quad (4)$$

$$T_{smax} = \alpha \cdot VI + b \quad (5)$$

$$T_{smin} = c \cdot VI + d \quad (6)$$

式中:TVDI——温度植被干旱指数;VI——像元的植被指数; $T_s$ ——任意像元的地表温度; $T_{smax}$ ——某一 NDVI 所对应的最高温度,即干边; $T_{smin}$ ——最低温度,即湿边; $a, b, c, d$ ——干湿边拟合方程的系数<sup>[19]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 构建特征空间

通过构建两期影像的  $T_s$ -NDVI 特征空间,并利用 TVDI 确定干、湿边(表 1)。由表 1 可以看出,特征空间的干边斜率均小于 0,这也表明随着 NDVI 的增加, $T_s$  的最大值呈减小趋势;湿边的斜率均大于 0,表明随着 NDVI 的增加, $T_s$  的最小值呈升高趋势。2003 年干、湿边的  $R^2$  均比 2013 年的大,干边的  $R^2$  均比湿边的大。

表 1 不同影像干湿边拟合结果

年份	干边	湿边
2003	$y = -49.234x + 350.18$ $R^2 = 0.92$	$y = 3.501x + 291.09$ $R^2 = 0.24$
2013	$y = -34.675x + 351.69$ $R^2 = 0.91$	$y = 7.597x + 291.42$ $R^2 = 0.20$

### 3.2 $T_s$ -NDVI 特征空间干旱等级的划分

为了从宏观上更加清晰了解艾比湖地区的土壤水分空间分布,利用 0~1 范围的灰度值进行描述,以 TVDI 为分级指标,便于观测区域干旱情况。根据 TVDI 灰度值范围将研究区干湿状况<sup>[20]</sup>分为湿润(0.0~0.2)、正常(0.2~0.4)、轻旱(0.4~0.6)、干旱(0.6~0.8)和重旱(0.8~1.0)共 5 个等级,以便准确描述区域土壤水分的变化状况。由图 2 可知,整个研究区的旱情等级分布明显,干旱的面积最大,湿润、轻旱和正常的面积次之,重旱的面积最小。

### 3.3 精度验证

将实测土壤水分的采样点对应的经纬度信息导入 TVDI 特征空间中,得到实测点对应的 TVDI 值,本研究采用 23 个土壤表层(0—10 cm)实测土壤水分数据用于反演精度验证<sup>[21]</sup>。由图 3 可知,TVDI 与艾比湖地区对应土壤表层实测土壤水分具有较好负相

关性,相关系数可达 0.604。利用 SPSS 19.0 并结合 Excel 2013<sup>[22]</sup> 软件,对 TVDI 和土壤水分的结果进行  $T$  检验,该线性回归方程通过了  $\alpha = 0.05$  的置信度且相关性较好。整体上看,随着土壤水分的增大,TVDI 呈逐渐减小趋势。这表明用 TVDI 反演 2013 年艾比湖地区土壤表层水分精度较高,具有可行性。因此,本文利用该方法反演 2003 年同一区域土壤水分,得到 2003 年旱情等级分布图(图 4)。

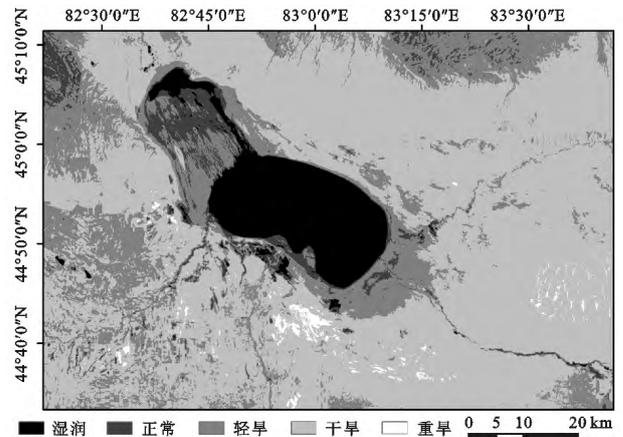


图 2 2013 年旱情等级分布

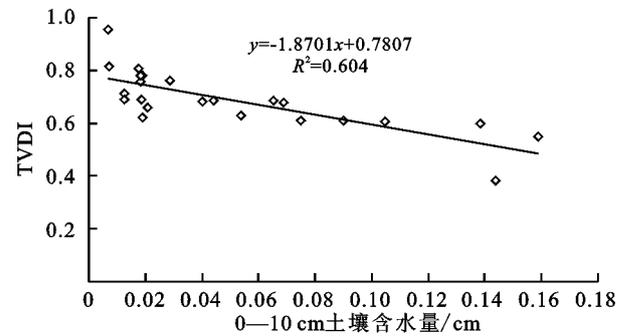


图 3 2013 年土壤水分与 TVDI 的相关关系

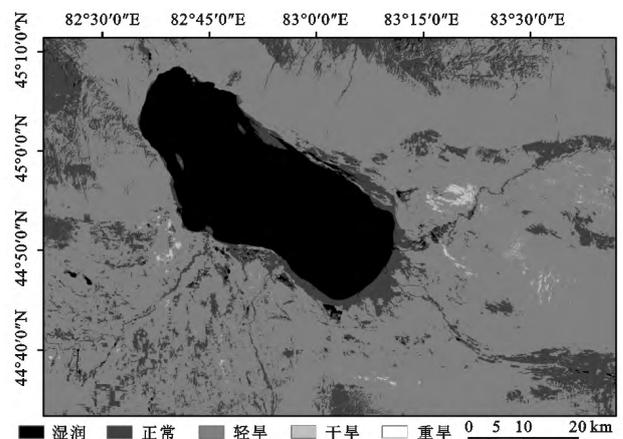


图 4 2003 年旱情等级分布

从图 4 可以看出,2003 年反演的土壤水分结果较好,其中湿润、正常和轻旱面积占有率较大,干旱和重旱面积较少,由湖区和河流向四周地区旱情情况逐渐加强。

### 3.4 土壤水分的时间变化分析

根据研究区遥感影像和其他资料,为更好地反映艾比湖地区 2003—2013 年各旱情变化状况,故采用决策树法<sup>[23]</sup>对 TVDI 值进行分类,利用转移矩阵方法描述艾比湖地区近 10 年来不同旱情等级转移情况和不同干湿程度的面积变化(表 2)。艾比湖地区土壤水分时间尺度效应明显:通过对比分析,艾比湖地区 10 年间的湿润、正常、轻旱、干旱和重旱分别变化了 464.31,1 072.69,4 342.59,5.03,0.03 km<sup>2</sup>,其中湿润轻旱面积变化最大,重旱面积变化最小;

由 2003 年湿润转为 2013 年的正常、轻旱、干旱、重旱对应的面积分别为 190.91,227.24,46.14,0.02 km<sup>2</sup>;由 2003 年的正常向湿润、轻旱、干旱和重旱分别转移了 7.32,609.39,454.77,1.21 km<sup>2</sup>;由 2003 年的轻旱分别向 2013 年的湿润、正常、干旱和重旱分别转移了 5.01,16.03,4 262.01,59.54 km<sup>2</sup>;由 2003 年的干旱向 2013 年的湿润、正常、轻旱和重旱分别转移了 0.05,0.10,1.48,3.40 km<sup>2</sup>;湿润、正常和轻旱面积减少,干旱和重旱面积增加,呈现“两增三减”的趋势。

表 2 2003 年与 2013 年干、湿面积转移矩阵

km<sup>2</sup>

干湿类型	2003 年					合计	
	湿润	正常	轻旱	干旱	重旱		
2013 年	湿润	551.74	190.91	227.24	46.14	0.02	1016.05
	正常	7.32	134.02	609.39	454.77	1.21	1206.70
	轻旱	5.01	16.03	830.46	4262.01	59.54	5173.05
	干旱	0.05	0.10	1.48	41.81	3.40	46.84
	重旱	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03
	合计	564.11	341.06	1668.56	4804.76	64.18	0.00

### 3.5 土壤水分空间变异性分析

艾比湖地区的特殊地理位置和特殊气候决定了其土壤水分的空间分异规律,在 10 年里研究区的旱情等级变化明显。从图 2,4 可以看出,艾比湖的旱情分布由湖区向四周干旱程度逐渐加强,土壤水分由湖区向周边地区呈减少趋势,离湖区越远,干旱情况越严重,土壤水分越低;河流附近土壤水分高于周边区域。随着海拔的升高,从平原到山坡到山地,土壤水分减少,山地的土壤水分低于平原;地势低的地方土壤水分高于地势高的地方,主要因为地势低,降水易积累,从而影响土壤水分的多少。农田地区土壤水分高于山地或者盐渍地,主要由于人类对农作物的灌溉,如喷灌、滴灌等,从而使土壤水分增大。从整体来看,土壤水分在山区的垂直变化明显,从南坡到北坡,土壤水分逐渐升高;西部的土壤水分高于东部,并且从西北到东南方向,土壤水分呈减小趋势。

降水量的变化是影响土壤水分的因子之一<sup>[27]</sup>,经在“中国气象科学数据共享网”查阅,艾比湖 10 年里降水总体上呈现减少趋势,降水是土壤水分主要来源,因此,在水分正常地区,土壤水分随着降雨量的减少而呈减少趋势;最后人类活动影响土壤水分<sup>[28-29]</sup>,该地区农作物的生长,如棉花,需要在生长期对其进行滴灌或者喷灌,加大了用水量,导致土壤水分出现季节性增加,进而影响艾比湖地区的土壤水分整个的时空变化规律。上述自然和人为因素是导致艾比湖地区水分变化的主要条件。

利用 TVDI 反演土壤水分较好,可以实现大面积快速的旱情监测分析,主要结论有:(1)艾比湖地区在 10 年里旱情转移明显,湿润向正常、轻旱和干旱转移,正常向轻旱和干旱转移,轻旱向干旱转移显著。(2)土壤水分由湖区及河流向周边地区呈现减少趋势;由农田向周边山地盐渍地等逐渐减少;地势低的地区土壤水分高于地势高的地方。因此,利用遥感监测艾比湖地区土壤水分,能很好地解释研究区土壤水分的时空变化规律,对地区旱情监测和农业发展提供了一定的依据。

## 4 结论与讨论

艾比湖地区的土壤水分变化受控于多种因素。首先,全球气候明显变暖<sup>[23]</sup>,蒸发变强,使得艾比湖地区土壤水分在 10 年里明显减少;其次,气候的改变使得湖区面积萎缩,水量下降,进而带来地下水位的下降<sup>[24-25]</sup>,对于附近河流的入水量及周边地区兵团引水灌溉具有重要的影响;再者,不同坡度、坡向等地形因子影响土壤水分<sup>[26]</sup>,艾比湖地区的山地、平原和丘陵等复杂的地形情况,使得土壤水分各不相同;同时,

艾比湖地区的土壤水分是全球水分循环的一部分,该地区维持着整个天山北坡经济的发展,因此需要树立节约意识,提高水的利用率,采取高效灌溉节水措施。在人类生产活动过程中,要协调好人与环境的关系,兴修水利,开荒造田,建设防护林带,扩大并稳定绿洲,进而改变土壤水分。

## 参考文献:

- [1] 孙中峰,张学培,张晓明,等. 晋西黄土区林地坡面土壤水分异质性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(2): 81-86.
- [2] 陈书林,刘元波,温作民. 卫星遥感反演土壤水分研究综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(11): 1192-12.
- [3] 闫峰,王艳姣. 基于  $T_s$ -EVI 特征空间的土壤水分估算[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 4884-4891.
- [4] Pohn H A, Offield T W, Watson K. Thermal inertia mapping from satellite-discrimination of geologic units in Oman[J]. J. Res. US Geol. Surv, 1974, 2(2): 147-158.
- [5] Gillies R R, Kustas W P, Humes K S. 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[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(15): 3145-3166.
- [6] Sandholt L, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index Pace for assessment of surface moisture status [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2): 213-224.
- [7] 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[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2): 225-242.
- [8] 张仁华. 改进的热量模式及遥感土壤水分[J]. 地理研究, 1990, 19(2): 101-112.
- [9] Wu M C, Ding J L, Wang G F. Regional soil moisture inversion based on surface temperature and vegetation index characteristic spaces [J]. Journal of Desert Research, 2011, 30(5): 570-576.
- [10] 张喆,丁建丽,李鑫,等. TVDI 用于干旱区农业旱情监测的适宜性[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 220-227.
- [11] 王宏,塔西甫拉提·特依拜,谢霞,等. 新疆艾比湖地区不同土地利用类型的土壤盐渍化敏感性评价[J]. 地理科学进展, 2011, 30(5): 593-599.
- [12] 王爽,丁建丽,王璐,等. 基于遥感的艾比湖流域近 20 a 生态服务价值对土地利用变化的响应[J]. 水土保持研究, 2014, 21(5): 144-149.
- [13] 钱亦兵,吴兆宁,常轶深,等. 艾比湖地区植被和土壤在南—北区段上的差异性分析[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5): 781-789.
- [14] 王璐,丁建丽. 基于景观尺度的艾比湖保护区 LUCC 变化及其驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 217-223.
- [15] 王春燕,王黎炜. 湖泊生态旅游资源定量评价研究:以艾比湖湿地国家级自然保护区为例[J]. 改革与战略, 2012, 28(2): 63-65.
- [16] 覃志豪,高懋芳,秦晓敏,等. 农业旱灾监测中的地表温度遥感反演方法:以 MODIS 数据为例[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(4): 64-71.
- [17] 毛克彪,唐华俊,周清波,等. 用辐射传输方程从 MODIS 数据中反演地表温度的方法[J]. 兰州大学学报, 2007, 43(4): 12-17.
- [18] 王树果,李新,韩旭军,等. 利用多时相 ASAR 数据反演黑河流域中游地表土壤水分[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(5): 582-587.
- [19] 辛景峰. 区域旱情遥感监测研究[D]. 北京:中国科学院遥感应用研究所, 2003.
- [20] 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[J]. 遥感学报, 2003, 7(5): 420-427.
- [21] Wang Xiujun, Chen Jian. Soil estimation based on the LST-EVI feature space[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(1): 46-53.
- [22] 刘金伟,李志忠,武胜利,等. 新疆艾比湖周边白刺沙堆形态特征空间异质性研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(4): 628-635.
- [23] 张红梅,吴基文,刘星,等. 特征提取和决策树法土地利用遥感分类[J]. 测绘科学, 2014, 39(10): 53-56.
- [24] 肖生春,肖洪浪,卢琦,等. 中国沙漠(地)生态系统水文调控功能及其服务价值评估[J]. 中国沙漠, 2013, 23(5): 1568-1576.
- [25] 刘永泉. 新疆艾比湖最优运行水位研究[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学, 2008.
- [26] 白天路,杨勤科,申佳. 黄土高原丘陵沟壑小流域土壤水分垂直分布变异特征及影响因子[J]. 生态学杂志, 2009, 28(12): 2508-2514.
- [27] 姜亚珍,张瑜洁,孙琛,等. 基于 TVDI 河北省干热风同期土壤湿度监测研究[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(3): 442-450.
- [28] 邓铭江. 新疆十大水生态环境保护目标及其对策探析[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 865-874.
- [29] 张雪,董建国,汪有科,等. 黄土丘陵区不同降雨条件下聚水沟土壤水分研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 129-135.