

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2014-0430

杨晓芳, 陈效逖, 罗翔中. 锡林郭勒草原遥感植被物候的地面照相验证[J]. 草业科学, 2015, 32(5): 667-674.

YANG Xiao-fang, CHEN Xiao-qi, LUO Xiang-zhong. Ground photography verification of remote sensing-derived vegetation phenology in the Xilinguole grassland[J]. Pratacultural Science, 2015, 32(5): 667-674.

锡林郭勒草原遥感植被物候的地面照相验证

杨晓芳¹, 陈效逖¹, 罗翔中²

(1. 北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871;

2. 加拿大多伦多大学地理与项目规划系, 加拿大 多伦多 M5S 3G3)

摘要: 利用内蒙古锡林郭勒整个生长季节的草地物候照相观测数据和不同的卫星遥感数据, 分析了二者之间的统计关系。结果表明, 1) MODIS 可见光波段的反射率与地面照相观测的平均亮度值之间呈显著正相关 ($P < 0.05$), 其中, 500 m 空间分辨率的 MODIS 反射率与地面照相平均亮度值之间的相关性最高, 而 TM/ETM+ 反射率与地面照相平均亮度值之间的相关不显著 ($P > 0.05$); 2) MODIS 归一化植被指数 (NDVI) 与地面照相相对绿度指数 (G%) 之间的正相关明显高于其他植被指数与绿度指数之间的相关性; 3) 基于遥感与地面照相数据提取的物候发生日期之间的误差大多在 7 d 之内。由此可见, 通过地面照相可以客观地评价遥感物候监测的可靠性, 这对于选择适宜的遥感数据源和物候监测指标, 具有重要的意义。

关键词: 草原物候; 卫星遥感; 地面照相; 实地验证

中图分类号: S812.29; S127

文献标识码: A

文章编号: 1001-0629(2015)05-0667-08*

Ground photography verification of remote sensing-derived vegetation phenology in the Xilinguole grassland

YANG Xiao-fang¹, CHEN Xiao-qi¹, LUO Xiang-zhong²

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Department of Geography and Program in Planning, University of Toronto, Toronto, ON M5S 3G3, Canada)

Abstract: Using photographic observation data of grassland phenology over the entire growing season and different satellite remote sensing data in Xilinguole of Inner Mongolia, we analyzed statistical relationships between the two datasets. The results showed that MODIS reflectance in visible light band positively correlated ($P < 0.05$) with the ground photographic digital number, in which the most significant correlation appeared between MODIS reflectance in 500 m spatial resolution and the ground photographic digital number. Nevertheless, TM/ETM+ reflectance did not significantly correlate ($P > 0.05$) with the ground photographic digital number. The positive correlation between MODIS Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and relative greenness index from ground photography (G%) was obviously higher than those between other vegetation indices and greenness indices. Errors between phenological occurrence dates derived from remote sensing and ground photography data were mostly within 7 days. In conclusion, the reliability of remote sensing phenology monitoring by means of ground photography was of crucial for

* 收稿日期: 2014-09-24 接受日期: 2015-01-19

基金项目: 中国北方温带秋季树木物候过程模型的构建与预测研究(41471033)

第一作者: 杨晓芳(1989-), 女, 河北石家庄人, 在读硕士生, 主要从事遥感物候研究。E-mail: yxfang@pku.edu.cn

通信作者: 陈效逖(1958-), 男, 北京人, 教授, 博士, 主要从事植物物候与遥感物候, 气候变化与植被动态研究。E-mail: cxq@pku.edu.cn

selecting appropriate remote sensing data source and phenological monitoring index.

Key words: grassland phenology; satellite remote sensing; ground photography; in situ verification

Corresponding author: CHEN Xiao-qiu E-mail: cxq@pku.edu.cn

植物物候现象如树木的展叶、叶变色和落叶,牧草的返青和黄枯等的发生受气候因子季节与年际变化的显著影响,并指示着植被与大气之间能量、水分和二氧化碳交换的季节性转换特征,已成为监测陆地生态系统对全球气候变化响应与反馈的重要指标^[1-2]。传统的植物物候研究主要基于地面单站个别物种的物候观测数据进行统计和过程模拟,难以进行大尺度的物候时空分析^[1]。随着卫星监测技术的发展,遥感数据被广泛用于大尺度的植被物候动态研究^[3-7],特别是中、高空间分辨率的 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)、MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)和 Landsat TM/ETM+(Thematic Mapper/Enhanced Thematic Mapper Plus)遥感植被指数数据可以有效地监测植被物候的时空变化及其对气候变化的响应^[8-13],从而弥补单站个别物种物候动态难以进行连续地理空间时空比较的不足,已经成为全球和区域植被物候研究的主要数据源。然而,由于遥感光谱信息只是对地面植被物候动态的一种估计,不能完全代表植被物候动态的实况,所以,遥感物候监测结果的地面验证就显得尤为重要^[14-18]。以往的遥感物候地面验证主要通过像元植被指数数据与站点植物物候数据之间的比较进行,存在着时空尺度不匹配的缺陷。近年来,一些研究主要通过两种途径获取地面像元尺度的物候数据,以便实施像元对像元的物候动态比较与验证:一是通过地面植物物候的加密观测获取植物群落物候信息^[2,12],二是通过近地面群落物候的照相观测获取植物群落反射率和绿度信息^[19-22]。对于后者来说,研究大多集中于森林区域^[20-22],而对草原区整个生长季节的观测与验证研究开展得较少。鉴于此,本研究选择内蒙古典型草原作为研究区域,采用数码相机实拍观测的方法,获取草原样地红、绿、蓝等光谱信息,并计算绿度指数和物候发生日期,据以评价来自不同数据源的遥感信息在监测草原植被季节动态和物候变化方面的可靠性,为建立基于地表实测数据与多尺度遥感数据的地面—遥感物候集成模型,提高遥感物候模拟与预测的准确性,提供野外试

验的依据。

1 数据与方法

1.1 试验地点

本研究的试验地点设在锡林浩特国家气候观象台(43°57' N,116°07' E)附近。该观象台位于锡林浩特市郊,海拔1 003 m,地处锡林郭勒典型草原区的中部。锡林郭勒草原属于中温带半干旱大陆性气候,光、温、水同季。这里光能资源丰富,全年日照百分率为55%~65%,年日照时数在2 900~3 100 h,其中,牧草生长季节所处的4—9月日照时数为1 500~1 700 h,占全年的48%~59%;年平均气温在0~3℃,且气温的季节变化明显,表现为冬季漫长而寒冷,夏季短促而温热,春温骤增,秋温剧降,积温有效性高,≥0℃的有效积温为1 800~2 200℃·d,无霜期60~100 d^[23];年降水量在250~350 mm,且多集中在6—8月,占全年降水量的60%~75%,而牧草生长季节所处的4—9月降水量约占全年降水量的90%^[24]。研究区内地形为开阔而平缓的波状高原,土壤为栗钙土,植物群落中的优势种为克氏针茅(*Stipa krylovii*)和羊草(*Leymus chinensis*)。

1.2 地面照相数据

在锡林浩特国家气候观象台附近围封的草地中选取一个与MODIS遥感影像1 km×1 km像元位置和大小都相对应的样地,在样地内按照样线法沿对角线均匀布设20个样方,并用GPS定位。拍摄所使用的数码相机为SONY P10,包括红(R)、绿(G)、蓝(B)3个可见光波段。为防止拍摄时的抖动,实际操作中将相机固定于三脚架顶端伸出的横杆上,镜头垂直向下,三脚架调至1.5 m高,照相采用VGA模式(最低像素),并设置2 s的照相延时。在拍摄时,尽可能避免三脚架及其阴影进入样地,以确保拍摄照片的质量。为了准确地监测样地内的草地物候状况,在2011年5月21日到9月9日期间,选择晴好天气,每隔5~7 d对各样方内的植被进行一次垂直拍摄采样,共获得400幅(20样方×20 d)有效照片数据(图1)。



图1 草原返青期(A)和黄枯期(B)的照片

Fig.1 Grassland photos of green-up phase (A) and brown-off phase (B)

1.3 遥感数据

参照上述地面照相的日期,选取同期 TM/ETM+和 MODIS 遥感影像数据。TM 数据取自 Landsat5 数据集,波段为红、绿、蓝和近红外,空间分辨率为 30 m;MODIS 数据取自 MCD43A4(500 m 分辨率)和 MCD43B4(1 000 m 分辨率)NBAR(Nadir BRDF-Adjusted Reflectance)16 d 合成产品数据集,波段为红、近红外、蓝和绿 4 个波段。两种

遥感数据与地面照相数据的时间对应关系显示(图 2),可用于统计分析的 TM/ETM+ 和地面照相平行观测数据为 9 个,日期分别为第 142、158、166、182、198、214、230、238 和 254 天。由于 MODIS 遥感数据为 16 d 合成的数据,且有 8 d 的重叠,故选择每幅 MODIS 数据 16 d 期间内(图 2 中的三角形底边所示)的多次照相数据进行平均,从而得到 15 个 MODIS 和地面照相平行观测数据。

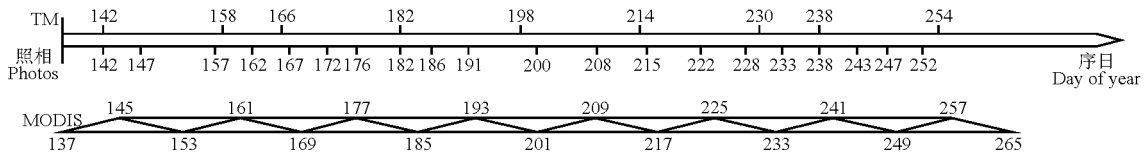


图2 遥感数据与地面照相数据的时间对应关系

Fig.2 Time corresponding relations between remote sensing data and ground photographic data

1.4 数据预处理

利用 MATLAB(R2010b)软件分别提取并计算每天 20 幅有效照片红(R)、绿(G)、蓝(B)3 个波段的平均亮度值(DN)。为了有效提取图像中的植被物候信息,根据植被与土壤背景物在红、绿、蓝 3 个波段吸收和反射特征的差异,分别选取绝对绿度指数(2G_{RB})、相对绿度指数(G%)和比值绿度指数(G/R)^[21],作为表征地面植被物候变化的指标。地面绿度指数的计算公式如下所示:

绝对绿度指数:

$$2G_{RB} = 2 \times G_{DN} - (R_{DN} + B_{DN}) \quad (1)$$

相对绿度指数:

$$G\% = G_{DN} / (G_{DN} + R_{DN} + B_{DN}) \quad (2)$$

比值绿度指数:

$$G/B = G_{DN} / R_{DN} \quad (3)$$

式中, R_{DN}、G_{DN} 和 B_{DN} 分别为红光、绿光和蓝光波

段的平均亮度值。

对于遥感数据的处理,首先利用 ArcMap10 对遥感影像进行裁剪,提取出 1 km×1 km 试验样地的遥感影像;然后,利用 ENVI4.5 提取出红(R)、绿(G)、蓝(B)和近红外(NIR)4 个波段的反射率,并计算归一化植被指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)和比值植被指数(RVI)。遥感植被指数的计算公式如下所示:

归一化植被指数:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (4)$$

增强型植被指数:

$$EVI = 2.5(NIR - R) / (NIR + 6.0R - 7.5B + 1) \quad (5)$$

比值植被指数:

$$RVI = NIR / R \quad (6)$$

式中, R、B 和 NIR 分别为红光、蓝光和近红外波段

的平均反射率。

1.5 相关分析

本研究采用简单相关系数来分析地面照相观测数据与不同数据源卫星遥感数据在反射率、绿度指数与植被指数和反演得到的相应物候发生日期之间,以及不同遥感数据源反射率和植被指数之间的相关关系,并对相关系数进行了显著性检验。一般来讲,显著正相关系数越大,表明遥感数据与地面照相数据监测草原物候变化的一致性越好,遥感物候监测的有效性越高。最终,选择与地面照相绿度指数正相关系数最大的遥感植被指数,作为最佳的草原物候遥感监测指标,从而为实现准确地开展草原植被物候的遥感监测,提供野外试验的依据。

1.6 物候发生日期的提取

地面照相绿度指数和遥感植被指数均可反映牧草叶片的生长状况和覆盖度,其数值具有明显的季节变化特征,表现为上半年数值逐渐增大(植被变绿过程),在达到最大值后,下半年数值逐渐减小(植被变黄过程)。本研究参考 Richardson 等^[21-22]的研究结果,利用逻辑斯蒂(Logistic)模型分别对选取的地面绿度指数和遥感植被指数季节变化曲线进行拟合,并提取植被变绿和变黄达到不同百分率 n ($n = 10\%, 20\%, \dots, 80\%, 90\%$) 时的关键物候发生日期。逻辑斯蒂模型的公式如下:

$$f(x) = a + \frac{b}{1 + e^{-dx}} \quad (7)$$

式中, $f(x)$ 为绿度指数或植被指数, x 为序日, a 、 b 、 c 、 d 为拟合参数,参数 a 为 $f(x)$ 的最小值, $a + b$ 为 $f(x)$ 的最大值,参数 c 、 d 控制着植被物候期的发生时间。

提取植被变绿和变黄各关键物候期发生时间的步骤是,先利用公式(8)和(9)计算地面绿度指数和遥感植被指数达到不同变绿或变黄百分率时所对应的数值 $[f_n(x)]$,再利用公式(10)计算不同变绿或变黄百分率所对应的物候期发生时间(序日),即 x 值。计算公式如下:

变绿过程:

$$f_n(x) = [f(x)_{\max} - f(x)_{\min}] \times n + f(x)_{\min} \quad (8)$$

变黄过程:

$$f_n(x) = f(x)_{\max} - [f(x)_{\max} - f(x)_{\min}] \times n \quad (9)$$

$$x = f^{-1}[f_n(x)] \quad (10)$$

式中, f^{-1} 为 $f(x)$ 的反函数, f_{\max} 和 f_{\min} 分别为植被变绿或变黄过程中地面绿度指数或遥感植被指数的最大值和最小值。

2 结果与分析

2.1 遥感反射率与地面照相平均亮度值之间的相关分析

MODIS 所获得的红光、绿光和蓝光波段的反射率与地面照相所获得的红光、绿光和蓝光波段的平均亮度值之间呈显著正相关关系 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$) (表 1), 且二者在红光波段的相关系数明显大于其他两个波段的。此外, 500 m 空间分辨率的 MODIS 反射率与地面照相平均亮度值之间的相关系数略大于 1 000 m 空间分辨率的 MODIS 反射率与地面照相平均亮度值之间的相关系数。相比之下, TM/ETM+ 遥感反射率与地面照相平均亮度值之间正相关关系均不显著 ($P > 0.05$)。

表 1 遥感反射率和地面照相平均亮度值之间的相关系数
Table 1 Correlation coefficient between remote sensing reflectance and ground photographic digital number

数据源及波段 Data source and wave band	地面照相 Ground photography		
	红光 R _{DN}	绿光 G _{DN}	蓝光 B _{DN}
MODIS_500m	红光 R	0.809**	—
	绿光 G	—	0.579*
	蓝光 B	—	0.722**
MODIS_1000m	红光 R	0.796**	—
	绿光 G	—	0.548*
	蓝光 B	—	0.710**
TM/ETM+	红光 R	0.630	—
	绿光 G	—	0.411
	蓝光 B	—	0.343

注: * 表示相关显著性水平为 0.05; ** 表示相关显著性水平为 0.01。表 2、表 4、表 5 同。

Note: * and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively. The same in Table 2, Table 4, Table 5.

应该指出, 本研究采用的 MODIS 数据产品是经过大气矫正获得的多日期合成的地面反射率, 其数据的稳定性和可靠性均较高, 而 TM/ETM+ 数据的空间分辨率虽然比 MODIS 高, 但由于受到拍摄当天云的干扰较大, 数据的稳定性和可靠性一般

较低,如在第158、166、198和238天的遥感影像中,云的覆盖率均达到20%,这可能是导致TM/ETM+遥感反射率与地面照相平均亮度值在3个波段的相关系数均较小的主要原因。

2.2 遥感植被指数和地面照相绿度指数之间的相关分析

各种遥感植被指数与地面绿度指数之间,除G/R与TM/ETM+EVI的相关系数(0.648)外,均存在显著的正相关关系($P < 0.05$) (表2),其中,MODIS植被指数与地面绿度指数之间的相关程度明显优于TM/ETM+植被指数与地面绿度指数之间的相关程度。在3种植被指数中,NDVI和RVI与地面绿度指数之间的相关系数均大于EVI与地面

表2 遥感植被指数与地面照相绿度指数之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between remote sensing vegetation index and ground photography greenness index

数据源及植被指数 Data source and vegetation index		地面照相 Ground photography		
		2G_RB	G/R	G/%
MODIS_500m	NDVI	0.948**	0.892**	0.951**
	EVI	0.940**	0.872**	0.936**
	RVI	0.949**	0.899**	0.947**
MODIS_1000m	NDVI	0.942**	0.879**	0.945**
	EVI	0.936**	0.863**	0.932**
	RVI	0.943**	0.886**	0.940**
TM/ETM+	NDVI	0.809**	0.753*	0.834**
	EVI	0.669*	0.648	0.703*
	RVI	0.897**	0.844**	0.897**

绿度指数之间的相关系数。在3种绿度指数中,2G_RB和G%与遥感植被指数之间的相关系数均大于G/R与遥感植被指数之间的相关系数。总体上看,500 m空间分辨率MODIS遥感数据中的NDVI与地面照相数据中的G%之间相关系数最大($r = 0.951$)。据此,本研究仅基于NDVI和G%分别进行遥感和地面照相物候期的提取,并进而分析遥感与地面照相所提取的物候期之间的相关关系。

2.3 遥感和地面照相提取物候期之间的相关分析

利用逻辑斯蒂模型拟合500 m空间分辨率MODIS NDVI和地面照相G%的时间序列(图3、图4),并采用百分比法分别进行遥感和地面物候期的提取。模型拟合结果表明,植被指数和绿度指数拟合值与观测值之间呈显著正相关,拟合优度(R^2)均在0.9以上。根据拟合的模型,计算得到以植被指数和绿度指数表征的植被变绿和变黄不同百分率所对应的日期(表3)。

对比遥感和地面照相物候期的发生时间可以看出,除了NDVI变绿10%物候发生日期比G%变绿10%物候发生日期偏晚16 d以外,二者其余各变绿百分率的物候发生日期(20%~90%)之间的偏差绝对值均 ≤ 7 d,且在变绿40%以后的所有物候发生日期中,NDVI的变绿百分率物候发生日期均早于相应的G%的变绿百分率物候发生日期。相比之下,由地面照相和遥感数据得到的相应变黄百分率物候发生日期一致性很高,最大偏差的绝对值仅为5 d,且在变黄20%以后的所有物候发生日期中,NDVI

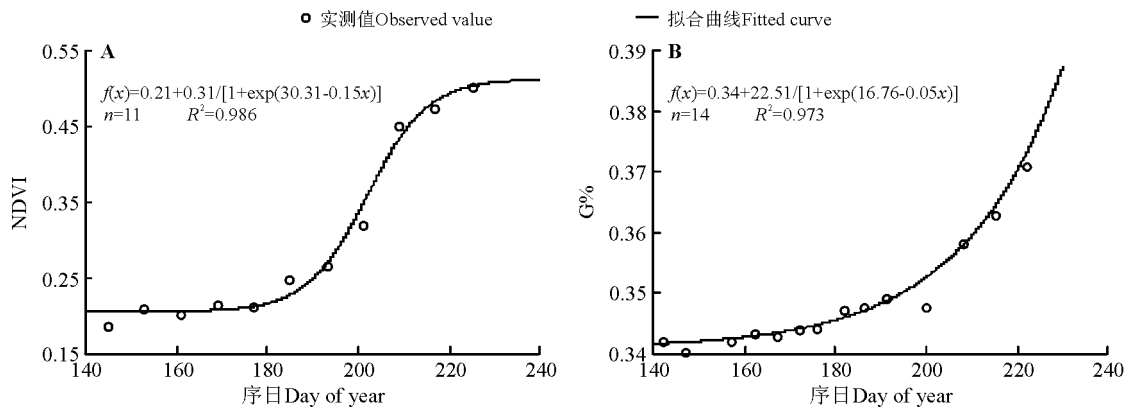


图3 植被变绿过程中NDVI(A)和G%(B)的逻辑斯蒂模型拟合

Fig.3 Logistic modeling of NDVI (A) and G% (B) during green-up process

注:n,样本数;R²,拟合优度。图4同。

Note: n, sample size; R², fitting goodness. The same in Fig.4.

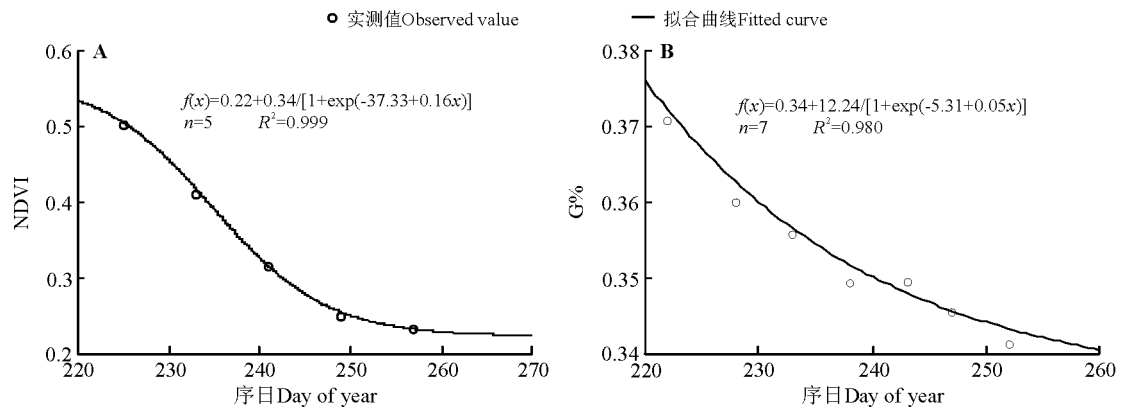


图 4 植被变黄过程中 NDVI(A)和 G%(B)的逻辑斯蒂模型拟合

Fig.4 Logistic modeling of NDVI (A) and G% (B) during brown-off process

表 3 不同变绿和变黄百分率的物候发生日期(序日)

Table 3 Phenological occurrence date of different green-up and brown-off percentages (day of year)

项目 Item	变绿百分率 Green-up percentage								
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
NDVI	181	190	195	198	201	203	206	210	214
G%	165	183	193	200	205	209	212	215	218
NDVI-G%/d	16	7	2	-2	-4	-6	-6	-5	-4
项目 Item	变黄百分率 Brown-off percentage								
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
NDVI	249	245	241	239	237	235	233	231	228
G%	250	244	240	236	233	231	228	226	225
NDVI-G%/d	-1	1	1	3	4	4	5	5	3

的变黄百分率物候发生日期均晚于相应的 G%的变黄百分率物候发生日期。

应该指出,上述研究结果是基于 2011 年的地面照相和遥感数据得到的,因此,并不能代表当地遥感与地面照相物候观测的一般特征。为了更加全面地评价遥感数据在监测草原植被物候方面的有效性和准确性,需要进行多年和多样地遥感与地面照相物候观测数据的比较分析。

2.4 MODIS 与 TM/ETM+反射率之间和植被指数之间的相关分析

MODIS_500m 和 MODIS_1000m 红光、绿光和蓝光波段的反射率之间均呈显著正相关关系 (P<0.01),且红光波段反射率之间的相关系数最大(表 4)。而 MODIS 与 TM/ETM+三波段反射率之间虽然也多呈显著正相关关系 (P<0.05),但

相关程度较低,且以蓝光波段反射率之间的相关性最好,绿光波段反射率之间的相关性最差,其中,1 000 m 空间分辨率的 MODIS 与 TM/ETM+绿光波段反射率之间的相关系数未通过显著性检验 (P>0.05)。

各种遥感植被指数之间的相关分析结果表明(表 5),MODIS 植被指数之间存在着显著的正相关关系 (P < 0.01),相关系数均接近于 1;而 TM/ETM+植被指数与两种 MODIS 植被指数之间也存在着显著正相关关系 (P<0.05),其中,RVI 之间的相关系数最大,其次为 NDVI,EVI 之间的相关系数最小。

3 结论

本研究通过对锡林浩特草原 1 km×1 km 像元的

表4 MODIS和TM/ETM+反射率之间的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between MODIS reflectance and TM/ETM+ reflectance

数据源及波段 Data source and wave band		TM/ETM+			MODIS_1000m		
		红光 R	绿光 G	蓝光 B	红光 R	绿光 G	蓝光 B
MODIS_500m	红光 R	0.644*	—	—	0.997**	—	—
	绿光 G	—	0.638*	—	—	0.987**	—
	蓝光 B	—	—	0.698*	—	—	0.986**
MODIS_1000m	红光 R	0.644*	—	—	—	—	—
	绿光 G	—	0.619	—	—	—	—
	蓝光 B	—	—	0.720*	—	—	—

表5 遥感植被指数之间的相关系数

Table 5 Correlation coefficient between the vegetation indexes

数据源及植被指数 Data source and vegetation index		TM/ETM+			MODIS_1000m		
		NDVI	EVI	RVI	NDVI	EVI	RVI
MODIS_500m	NDVI	0.812**	—	—	0.999**	—	—
	EVI	—	0.696*	—	—	1.000**	—
	RVI	—	—	0.865**	—	—	0.999**
MODIS_1000m	NDVI	0.800**	—	—	—	—	—
	EVI	—	0.690*	—	—	—	—
	RVI	—	—	0.859**	—	—	—

全生长季节地面照相监测和 TM/ETM+ 与 MODIS 遥感数据的收集,分析了 2011 年样地照相观测数据与不同数据源卫星遥感数据在反射率、植被指数与绿度指数和反演得到的物候期方面的相关关系,以及不同遥感数据源反射率和植被指数之间的相关关系,得到以下结论:

1)MODIS 遥感可见光波段反射率与地面照相观测的平均亮度值之间呈显著正相关,其中,较高空间分辨率的 MODIS 反射率和地面照相平均亮度值之间相关程度最高;而 TM/ETM+ 反射率与地面照相平均亮度值之间的相关不显著。

2)遥感植被指数与地面绿度指数之间存在显著

的正相关关系,其中,500 m 空间分辨率的 MODIS 归一化植被指数(NDVI)与地面照相相对绿度指数(G%)之间的相关程度最高。

3)根据 500 m 空间分辨率的 MODIS/NDVI 遥感数据与地面照相 G%数据所提取的不同变绿百分率(除 10%变绿百分率外)的物候发生日期和变黄百分率的物候发生日期之间误差在 7 d 以内。

4)MODIS 和 TM/ETM+ 数据的波段反射率之间和植被指数之间均存在显著的正相关,且植被指数之间的相关系数大于波段反射率之间的相关系数,NDVI 之间和 RVI 之间的相关性大于 EVI 之间的相关性。

参考文献

- [1] Luo X Z, Chen X Q, Wang L X, Xu L, Tian Y H. Modeling and predicting spring land surface phenology of the deciduous broadleaf forest in northern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 198: 33-41.
- [2] Liang L, Schwartz M D, Fei S. Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(1): 143-157.
- [3] 张云霞, 李晓兵, 陈云浩. 草地植被盖度的多尺度遥感与实地测量方法综述[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 85-93.

- [4] 张云霞, 李晓兵, 张云飞. 基于数字相机, ASTER 和 MODIS 影像综合测量植被盖度[J]. 植物生态学报, 2007, 31(5): 842-849.
- [5] 赵冰茹, 刘闯, 刘爱军, 王正兴. 利用 MODIS-NDVI 进行草地估产研究——以内蒙古锡林郭勒草地为例[J]. 草业科学, 2004, 21(8): 12-15.
- [6] Reed B C, Brown J F, van der Zee D, Loveland T R, Merchant J W, Ohlen D O. Measuring phenological variability from satellite imagery[J]. Journal of Vegetation Science, 1994, 5(5): 703-714.
- [7] Pu R, Gong P, Tian Y, Miao X, Carruthers R I, Anderson G L. Using classification and NDVI differencing methods for monitoring sparse vegetation coverage: A case study of saltcedar in Nevada, USA[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(14): 3987-4011.
- [8] Zhang X, Friedl M A, Schaaf C B, Strahler A H, Hodges J C, Gao F, Reed B, Huete A. Monitoring vegetation phenology using MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(3): 471-475.
- [9] 王宏, 李晓兵, 余弘娟. 基于 NOAA/AVHRR NDVI 监测中国北方典型草原的生长季及变化[J]. 植物生态学报, 2006, 30(3): 365-374.
- [10] 刘爱军, 韩建国. 天然草原生育期遥感估测方法研究——以锡林郭勒盟草原为例[J]. 草业科学, 2007, 24(7): 1-5.
- [11] 游松财, 宋春桥, 柯灵红, 刘高焕, 钟新科. 基于 MODIS 植被指数的藏北高原植被物候空间分布特征[J]. 生态学杂志, 2011, 30(7): 1513-1520.
- [12] Liang L, Schwartz M D. Landscape phenology: An integrative approach to seasonal vegetation dynamics[J]. Landscape Ecology, 2009, 24(4): 465-472.
- [13] Fisher J I, Mustard J F. Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat, and MODIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 109(3): 261-273.
- [14] Chen X Q, Tan Z J, Schwartz M D, Xu C X. Determining the growing season of land vegetation on the basis of plant phenology and satellite data in Northern China[J]. International Journal of Biometeorology, 2000, 44(2): 97-101.
- [15] Chen X, Hu B, Yu R. Spatial and temporal variation of phenological growing season and climate change impacts in temperate eastern China[J]. Global Change Biology, 2005, 11(7): 1118-1130.
- [16] Fisher J I, Mustard J F, Vadeboncoeur M A. Green leaf phenology at Landsat resolution: Scaling from the field to the satellite[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(2): 265-279.
- [17] Chen X Q, Luo X Z, Xu L. Comparison of spatial patterns of satellite-derived and ground-based phenology for the deciduous broadleaf forest of China[J]. Remote Sensing Letters, 2013, 4(6): 532-541.
- [18] Luo X Z, Chen X Q, Xu L, Myneni R, Zhu Z C H. Assessing performance of NDVI and NDVI3g in monitoring leaf unfolding dates of the deciduous broadleaf forest in northern China[J]. Remote Sensing, 2013, 5(2): 845-861.
- [19] 任世龙, 宜树华, 陈建军, 秦彧, 王晓云. 基于不同数码相机和图像处理方法的高寒草地植被盖度估算的比较[J]. 草业科学, 2014, 31(6): 1007-1013.
- [20] Sonnentag O, Hufkens K, Teshera-Sterne C, Young A M, Friedl M, Braswell B H, Milliman T, Keefe J, Richardson A D. Digital repeat photography for phenological research in forest ecosystems[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 152: 159-177.
- [21] Richardson A D, Julian P. Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleaf forest[J]. Oecologia, 2007, 152(2): 323-334.
- [22] Richardson A D, Braswell B H, Hollinger D Y, Jenkins J P, Olinger S V. Near-surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology[J]. Ecological Applications, 2009, 19(6): 1417-1428.
- [23] 胡春. 内蒙古自治区农牧林业气候资源[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1985: 28-39.
- [24] 《内蒙古草地资源》编委会. 内蒙古草地资源[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1990: 2-12.

(责任编辑 武艳培)