

锡林郭勒草原地表反照率对气候变化的响应

张学珍

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:在对锡林郭勒草原地区 MODIS 的地表反照率产品 (MCD43C3) 的可靠性进行评估的基础上, 利用该产品分析了 2002~2009 年锡林郭勒草原地表反照率的变化及其与温度和降水的关系。结果表明: (1) MODIS 的反演结果能够很好地反映地表反照率的季节变化和年际变化特征; (2) 锡林郭勒草原可见光波段反照率的季节变化呈 V 字形, 低谷出现在 8 月上旬, 近红外波段的则呈 U 字形, 低值时段为 6~9 月; (3) 可见光和近红外波段反照率的年际变化特征基本一致, 其与温度和降水的年际波动有显著相关关系, 其中, 温度与地表反照率仅在生长季初期和末期显著相关, 分别是负相关 (相关系数为 -0.67) 和正相关 (0.63), 降水量与地表反照率在整个生长季都显著负相关 (-0.54~-0.76), 并且其影响效果有 2~3 个月的滞后期。

关 键 词: 典型草原; 地表反照率; 气候变化; MODIS 产品

文章编号: 1000-0585(2012)02-0299-12

1 引言

地表反照率与大气之间的作用是地-气相互作用中的重要过程。自从 Charney 等指出沙漠地区地表反照率增大可导致区域气候干旱化^[1]以来, 地表反照率的气候效应逐渐成为地球系统科学的热点问题。围绕这一问题, 在过去 30 余年间, 科学界开展了大量的区域尺度的数值模拟试验^[2~5]、地面观测^[6]和卫星遥感观测^[7], 以及全球尺度的数值模拟试验^[8~10]。地表反照率变化及与之有关的地表能量收支变化已被认为是气候变化的重要驱动因子^[11]。

与大量关注地表反照率影响气候的研究形成鲜明的对比, 少有研究分析地表反照率对气候变化的响应。已有的研究表明地表反照率同时受太阳高度角, 比如 Grant 等^[12]、刘辉志等^[13]和张果等^[14], 和地表物理状况的影响, 其中研究较多的地表物理因子是表层土壤含水量, 比如 Minnis 等^[15]、Liu 等^[16]、李国平等^[17]和张果等^[14], 较少涉及其它因子, 比如温度, 而探讨气候变化影响地表反照率的研究就更少了。根据何勇等^[18]、刘成林等^[19]、陈燕丽等^[20]、邵全琴等^[21]和张戈丽等^[22]等研究, 温度和降水对草地的生长状况 (以 NDVI 和 GPP 表示) 有深刻影响。植被生长状况的变化一方面改变了植被本身的光学特性; 另一方面也改变了单位面积内的植被覆盖度, 对地表的光学特性产生更大的影响。王继燕等就曾发现地表反照率与 NDVI 等植被指数有很好的负相关关系^[23]。目前,

收稿日期: 2011-04-13; 修订日期: 2011-09-25

基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划 (2010CB951801、2010CB950903); 国家自然科学基金项目 (41001122、41030101)

作者简介: 张学珍 (1981-), 男, 山东济宁人, 博士, 助理研究员, 主要从事地-气相互作用的数值模拟研究。

E-mail: xzzhang@igsnnr.ac.cn

却少有研究探讨典型草原连续多年的地表反照率变率（多年平均变幅以及年际之间的变幅），以及气候变化—植被覆盖—地表反照率之间的关系。然而，这方面的研究对加深认识地—气作用过程中的反馈关系、验证和改进陆面过程模型具有重要意义。

刘辉志等^[13]、刘帅等^[24]和张果等^[14]野外实地观测均表明植被覆盖区域的地表反照率具有明显的年际变化，但是未进一步分析年际变幅以及年际变幅大小与气候变化之间的联系。Wang 等利用 MODIS 的 2001~2003 年观测资料初步分析了加拿大 Saskatchewan 草地国家公园的地表反照率对气候变化的响应^[25]。该项研究所用资料时限较短，研究结论的普适性还有待与更多研究的对比。

本研究拟利用更长时间的 MODIS 观测数据（2002~2009 年），在评估基于 MODIS 观测资料反演的中国北方典型草原地表反照率数据精度的基础上，揭示该地区无积雪覆盖的地表反照率的季节变化和年际变化特征，并利用统计分析方法探讨该地区地表反照率对气候变化的响应，以期能为更全面地认识地—气作用过程提供科学依据。

2 研究区概况

为揭示地表反照率自然的季节变化和年际变化，本文以受人类活动影响最微弱的典型草原——锡林郭勒草原自然保护区为研究区。该自然保护区设立于 1985 年，在 1987 年成为联合国教科文组织“人与生物圈”计划的国际生物圈保护区网络成员，于 1997 年被批准为国家级自然保护区。保护区位于内蒙古锡林郭勒草原中部，地处北纬 $43^{\circ}26' \sim 44^{\circ}39'$ 、东经 $115^{\circ}32' \sim 117^{\circ}12'$ ，总面积约 1 万 km^2 ，是目前最大的国家级草地自然保护区。该区为温带大陆性的半干旱气候，1971~2000 年平均气温为 2.6°C ，年降水量 286.3mm。其中，6~8 月平均气温为 19.7°C ，降水量为 202.7mm，雨热同期，对牧草生长十分有利。冬季积雪充足，为第二年牧草返青积蓄了水分。典型草原是研究区代表性的植被类型，主要包括大针茅草原和羊草草原。

鉴于锡林郭勒草原自然保护区内只有一个国家基本气象站——锡林浩特气象站（ $43^{\circ}57'\text{N}$ 、 $116^{\circ}4'\text{E}$ ，990.8m），其观测结果仅代表有限范围内的气象状况，所以为了较为客观、真实地分析地表反照率对气候变化的响应，本文的研究区仅限于该气象站周围 30 km 以内的范围，而未涉及整个自然保护区（图 1）。

3 资料来源与研究方法

3.1 数据来源

本文采用的地表反照率数据来自 MODIS BRDF/Albedo 系列产品之一——MCD43C3 数据集^[26]。它包括 7 个窄波段和 3 个宽波段（可见光波段 $0.3 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 、近红外波段 $0.7 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 和短波波段 $0.3 \sim 5.0 \mu\text{m}$ ）的黑空反照率参数和白空反照率，以及太阳天顶角、数据质量标识和积雪覆盖面积百分率。文中以可见光波段和近红外波段的正午时刻（地方

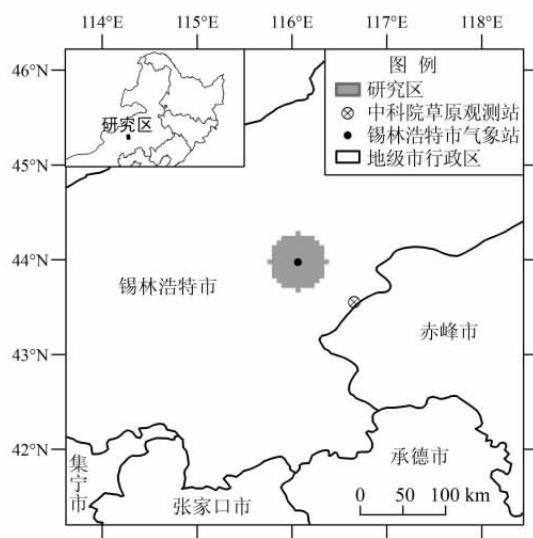


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

时) 黑空反照率为研究对象, 因为二者反映了正午时刻地表对直射太阳光的反照率; 研究时段为 2002~2009 年。数据的空间分辨率为 0.05° (经纬度), 相邻两个时次相隔 8 天, 但是每个时次的数据反映的是自该日之后连续 16 天的平均状况, 这是因为反演 1 个时次的反照率利用的是自该日之后连续 16 天内传感器接收到的全部有效数据 (样本)^[27]。数据下载自 USGS Land Processes Distributed Active Archive Center^①。

由于本文的研究区仅限于锡林浩特气象站 ($43^{\circ}57'N$ 、 $116^{\circ}4'E$) 周围 30 km 范围内, 大约相当于 6 个分辨率为 0.05° 的网格以内的范围, 共计包括 113 个网格。需要说明的是, 在进行资料分析时, 锡林浩特市所在的网格被排除, 因为该网格的主要土地覆盖类型为建筑物, 它与典型草原的地表反照率相差甚大; 另外, 为减少结果的不确定性, 本文仅选用了质量标识为 0 (best quality, 75% or more with best full inversions) 或 1 (good quality, 75% or more with full inversions), 并且太阳天顶角不大于 70° 的网格数据进行分析, 下文将满足此条件的网格称为“有效网格”, 各时次的有效网格数量如图 3 所示。

本文采用的气象数据为锡林浩特气象站 ($43^{\circ}57'N$ 、 $116^{\circ}4'E$) 2002~2009 年逐日观测资料, 包括日平均温度和日降水量 (雨和雪), 下载自中国气象科学数据共享服务网^②。

3.2 数据处理

3.2.1 MCD43C3 数据精度评估 本文在分析研究区地表反照率的季节和年际变化及其对气候变化的响应之前, 通过对比野外观测的地表反照率与 MCD43C3 中的数值, 评估了后者的误差范围。野外观测资料为中国科学院内蒙古草原生态系统定位观测站 ($43^{\circ}33'N$ 、 $116^{\circ}40'E$) 2003~2007 年 5 月~9 月短波波段 (宽波段 $0.3\sim5\mu m$) 地表反照率, 时间分辨率为 7 天^[24]。该观测站位于研究区的南缘, 具有与本文研究区相同类型的植被覆盖, 所以该观测站 MCD43C3 资料的误差能够代表本研究区 MCD43C3 资料的误差。

文中通过对来自 MCD43C3 的 2003~2007 年平均的 5~9 月短波波段 (宽波段 $0.3\sim5\mu m$) 地表反照率的时间序列进行线性内插, 得到与野外观测具有相同时间分辨率 (7 天) 的时间序列。在此基础上, 一方面计算了观测数据与 MCD43C3 数据的相关系数, 另一方面计算了两套数据之差。需要说明的是, 鉴于利用 MODIS 观测数据反演的积雪覆盖地区的地表反照率有较大误差^[28], 本研究暂不分析积雪覆盖变化导致的地表反照率变化, 所以野外观测站 2006 年 9 月 7~8 日降雪后两个时次 (9 月上、中旬) 的观测数据未与 MCD43C3 数据进行对比分析; 另外 MCD43C3 中的无效数据 (质量标识不是 0 或 1 的数据) 也未纳入分析, 实际参与分析的有效数据共计 84 对。

3.2.2 区域平均反照率的计算 计算 2002~2009 年平均的地表反照率季节变化的方法如下: 首先, 逐个时次 (46 个时次) 地抽取每一年该时次全部有效网格的反照率, 并计算该时次的有效网格数, 然后根据有效网格的数量分别采用不同的方法进行计算。具体而言, 如果有效网格少于最大有效网格数量的 $1/3$ (在此为 $8\text{ 年}\times112\text{ 网格/年}\times33.3\%\approx299$ 个), 其平均值可能具有较大的随机性, 不足以代表区域平均状况, 对此将不做进一步计算; 如果有效网格数超过该阈值, 将依据积雪覆盖网格数的多少, 分别予以计算: (1) 积雪覆盖网格数少于有效网格数的 $1/3$ 时, 直接计算无积雪覆盖网格的平均反照率; (2) 积雪覆盖网格数超过有效网格数的 $2/3$ 时, 利用积雪覆盖度为 $5\%\sim95\%$ 的网格的数

①http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/

②http://cdc.cma.gov.cn

据,在网格数(样本量) ≥ 19 的情况下,构建以积雪覆盖度为自变量,以反照率为因变量的一元一次回归方程,该方程的常数项即为无积雪覆盖的地表反照率。对于不满足上述任意一条件的时次,本文将作为缺失数据处理。

上述无积雪覆盖的地表反照率的计算过程,对于可见光波段反照率和近红外波段反照率以及整个短波波段分别进行。这三个波段均得到了 38 个时次的反照率数值,其中有 36 个时次满足上述条件(1),有 2 个时次满足条件(2)。

对于某一年而言,各时次无积雪覆盖的地表反照率的计算方法同上。2002~2009 年间,对于任意一波段,均可得到 249 个时次的反照率数值,其余的 119 个时次中,有 106 个时次因有效网格数量少于最大有效网格数量的 $1/3$ 被认为缺失数据,另外 13 个时次因不满足上述条件(2)被认为缺失数据。

3.2.3 区域平均地表反照率与温度和降水的相关分析 鉴于可见光波段反照率和近红外波段反照率相对于多年平均值的正、负距平的年际变化位相基本相似(图 4),所以本文仅分析了可见光波段反照率与温度和降水变化的相关关系。基于图 3 所示的反照率季节变化特征,并考虑到秋末—春初 MCD43C3 数据质量欠佳,本文只分析了三个特征时期的反照率与温度和降水变化的相关关系,它们依次为:反照率降低期(以下称为“生长季初期”),取第 13 个时次至第 18 个时次(4 月 7 日~6 月 1 日);反照率低谷期(以下称为“生长季盛期”),取第 21 个时次至第 29 个时次(6 月 20 日~8 月 28 日);反照率上升期(以下称为“生长季末期”),取第 33 个时次至第 38 个时次(9 月 14 日~11 月 8 日)。

鉴于反照率数据相邻两个时次间隔 8 天,每个时次的的数据表征了自该日之后连续 16 天内的平均状况,所以对日平均温度和降水量也做了同样的处理,即自每年的 1 月 1 日每隔 8 天计算了自该日之后连续 16 天的平均温度和总降水量,使温度和降水量序列与反照率序列具有相同的时间属性。为增加统计样本量,本文以三个时次(相当于 1 个月)平均为一个统计样本,分别计算上述三个特征时期反照率与前期和同期温度和降水量的相关系数。在此,为剔除年内季节变化信号的影响,本研究对每个统计样本的年际变化序列均进行了标准化处理,然后再计算标准化的反照率与温度和降水量之间的相关系数。以生长季初期反照率与同期温度的相关分析为例,首先计算第 13~15 时次平均的反照率和平均温度、计算第 16~18 时次平均的反照率和平均温度,这样就得到 2 对统计样本,对每一年均进行如此计算,共计得到 16 对统计样本,再对同一个时次的反照率和平均温度年际变化序列分别进行标准化处理,然后计算标准化的反照率与温度的相关系数。以生长季初期反照率与前一时次至同期的平均温度的相关分析为例,首先计算第 13~15 时次平均的反照率和第 10~15 时次平均温度、计算第 16~18 时次平均的反照率和第 13~18 时次平均温度,这样就得到 2 组(对)统计样本,对每一年均进行如此计算,共计得到 16 组(对)统计样本,再对各时次的反照率的年际变化序列和平均温度的年际变化序列分别予以标准化处理,然后计算反照率与平均温度的相关系数。以此类推,分别计算了每个特征时期平均反照率与同期及前期温度和降水的相关系数。

4 结果分析

4.1 遥感反演的反照率与野外定点观测值的对比

如图 2 和表 1 所示,基于 MODIS 资料反演的地表反照率与野外观测值具有高度显著的相关关系。2003~2007 年 5~9 月两套资料全部有效数据(84 对)的相关系数为 0.78,

达到 99.9% 的置信水平。其中，2004 年和 2005 年两套数据间的相关系数最大，分别达 0.94 和 0.96，2007 年的相关系数最小，也达到了 0.69，都达到了 99% 的置信水平；就剔除季节循环信号之后的距平序列而言，两套资料的相关系数为 0.36，达到了 99.9% 的置信度水平。由此可以看出，遥感反演结果不仅能够很好地表征地表反照率的年内季节变化，而且也能够反映地表反照率的年际变化。

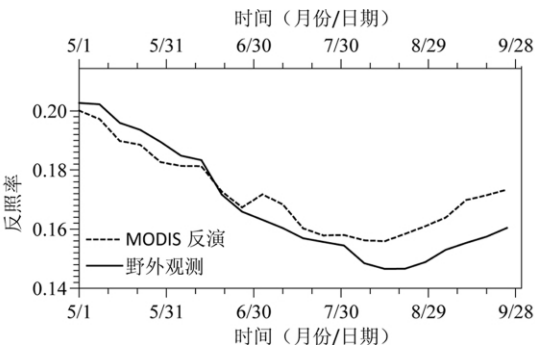


图 2 锡林郭勒草原观测站 (43°33'N、116°40'E) 2003~2007 年平均的短波波段反照率的季节变化 (5~9 月)

Fig. 2 Mean of seasonal cycle of surface albedo in shortwave band in growing season (May to September) during 2003~2007 at the Xilin Gol grassland ground observation site (43°33'N, 116°40'E)

表 1 锡林郭勒草原观测站 (43°33'N、116°40'E) 观测的地表反照率与基于 MODIS 资料反演结果之间的差异

Tab 1 Differences between the observed and MODIS-retrieved surface albedo in shortwave band for the Xilin Gol grassland ground observation site (43°33'N、116°40'E)							
项目	年份	2003	2004	2005	2006	2007	2003~2007
总样本量		12	17	20	17	18	84
	反演值>观测值的样本量	6	15	20	6	16	63
5~9 月平均反照率	观测值	0.162	0.168	0.164	0.182	0.160	0.168
	反演值	0.161	0.174	0.178	0.175	0.170	0.174
观测值与反演值的相关系数		0.84	0.94	0.96	0.86	0.69	0.78

注：野外观测的地表反照率引自文献 [24]。

需要说明的是，遥感反演结果与野外观测值存在系统性偏差，前者比后者总体偏大约 10%（表 1），并且主要体现在 7 月~9 月（图 2）。这一方面可能是由于遥感反演结果确实大于野外观测值（反演算法决定的），另一方面数据的空间尺度差异也可能是原因之一。遥感反演结果代表的是 0.05°×0.05°（经纬度）网格内的平均状况，后者仅表征观测点（不超过数十平方米）的状况。但是，无论是哪种原因导致的差异，由于差异是系统性的，所以都不会影响遥感反演结果揭示出的地表反照率季节和年际变化的形式和相对幅度。

4.2 地表反照率的季节变化

图3展示了无积雪覆盖的可见光和近红外两个波段反照率2002~2009年平均的季节变化。可以看出,可见光波段反照率自春至秋的变化近似于V字形,冬末春初和秋末冬初较高,其中2月下旬大约为0.155,11月下旬大约为0.15,夏季较低,其中8月上、中旬最低,大约为0.086,据此计算年内变幅大约为0.07。自夏至秋,反照率的降低具有明显的阶段性,可以分为3个阶段:平稳期(2月份)、缓慢下降期(3~4月)和快速下降期(5~7月);自夏至秋(8月中旬至11月末),反照率稳定、持续的上升。

近红外波段反照率季节变化的形式与可见光波段是基本一致的,即自夏至秋,逐渐减小,自夏至秋,逐渐增加,但是年内变幅为0.05,小于可见光波段的年内变幅,并且变化近似于U字形。自3月上旬至6月上旬,反照率缓慢降低;在6月中、下旬经历急剧下降后,直到9月下旬一直维持平稳的状态,围绕0.26做小幅度振荡;然后,在9~10月上、中旬经历缓慢增加后,进入10月下旬后开始迅速增加。

短波波段反照率的季节变化形式与可见光波段的比较相似(图3),这是因为短波波段反照率是可见光波段反照率和近红外波段反照率的加权平均值,而在到达地表的太阳辐射能中可见光波段的能量远大于近红外波段的能量。如图3所示,短波波段反照率的最大值出现在春初和秋末,大约为0.23,最小值出现在8月上旬,大约为0.17,年内变幅大约为0.06,介于可见光波段与近红外波段的季节变幅之间。

4.3 地表反照率的年际变化

图4刻画了地表反照率的年际变化,由此可以看出,地表反照率有明显的年际变化,并且各季节反照率正、负距平的年际变化位相是不同的。就可见光波段反照率而言,2002年春、夏、秋季均为正距平,三季节平均正距平幅度为0.015(相当于多年平均值的14%,下同),其中5月中旬~7月中旬正距平幅度最大,平均为0.02(20%);2003年春季为正距平,夏季和秋季为负距平,其中6月中旬~7月负距平幅度最大,平均为-0.02(-22%);2004年6~7月为弱正距平,3~4月和8~11月为负距平,其中9月负距平幅度最大,平均为-0.016(-16%);2005年春季和秋季反照率与多年平均值大致相等,夏季为弱负距平,其中7月中旬~8月中旬负距平幅度最大,平均为-0.01(-11%);2006年除10

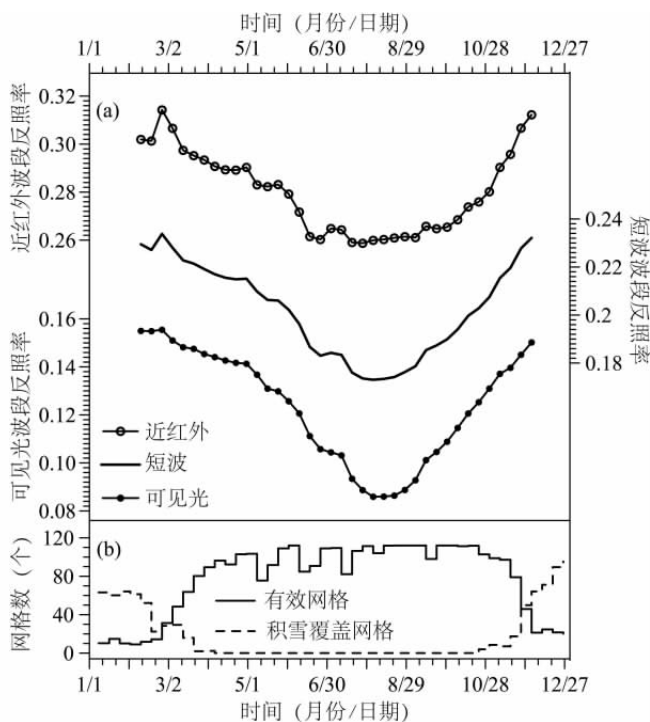


图3 (a) 2002~2009年平均的反照率季节变化及(b)有效网格数和积雪覆盖网格数

Fig. 3 (a) Mean of seasonal cycle of surface albedo during 2002~2009 and (b) numbers of valid data pixels and snow cover pixels

月下旬~11月为弱负距平以外,其余月份均为正距平,其中4~5月和8月中旬~9月上旬正距平幅度较大,前一时期平均为0.015(11%),后一时期平均为0.01(14%);2007年6月之前为负距平,6月份以后则与多年平均值大致相等,其中5月中旬~6月中旬的负距平幅度最大,平均为-0.014(-11%);2008年的距平状况与2005年几乎相同,只是最大的负距平出现在6月上旬-中旬和8月中旬-9月上旬,其负距平幅度平均为-0.01(-13%);2009年3月和7月中旬~10月上旬为正距平,其余月份为负距平,其中7月下旬~8月正距平幅度最大,平均为0.01(13%),5月中旬~6月上旬负距平幅度最大,平均为-0.017(-13%)。

近红外波段反照率正、负距平的年际变化位相与上述可见光波段的基本一致,在图4所示的248个时次的观测数据中,有199个(80%)时次近红外与可见光波段反照率的正、负距平是一致的。近红外与可见光波段反照率的正、负距平不一致主要出现在三个时期:2004年6~7月、2007年6月下旬~8月上旬、2009年7月中旬~10月上旬,在这三个时期二者的不一致性均表现为前者为负距平,而后者为正距平。

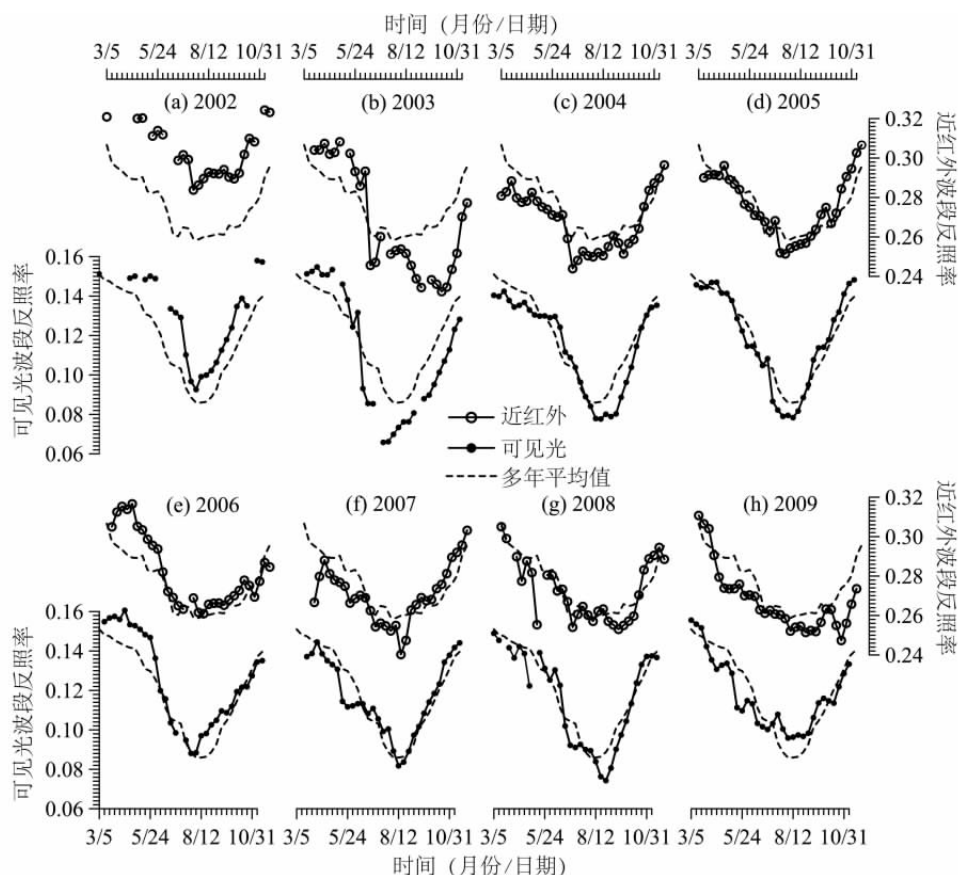


图4 可见光和近红外波段2002~2009年逐年的及多年平均的地表反照率季节变化

Fig. 4 Annual and mean of seasonal cycle of surface albedo in visible band and infrared band during 2002~2009

4.4 2002~2009 年温度和降水的变化

图 5 显示了锡林浩特 2002~2009 年春 (3~5 月)、夏 (6~8 月) 和秋季 (9~10 月) 温度和降水变化的基本特征。由此图看出, 秋季的气候变率较大, 降水变幅介于 -62% ~ 91% , 温度变幅介于 -2.7°C ~ 1.4°C ; 春季和夏季的气候变率大致相当, 降水的变幅为 -51% ~ 71% , 温度的变幅分别为 -1.2°C ~ 1.2°C 和 -1.7°C ~ 1.6°C 。2002 年和 2005 年的典型气候特征为春、夏、秋降水量持续偏低, 其差别表现为 2002 年为春暖秋冷, 2005 年则为春冷秋暖。2003 年和 2004 年的典型气候特征为降水量持续偏多, 2003 年尤为明显。2006 年的典型气候特征为春夏降水少、秋季降水多, 春冷秋暖; 2007 年则表现为春季降水多、温度低, 夏季和秋季降水持续偏少, 温度偏高; 2008 年主要表现为春季温度高、秋季降水少, 2009 年则是春季温度高、降水偏多, 夏季和秋季温度偏低、降水偏少。

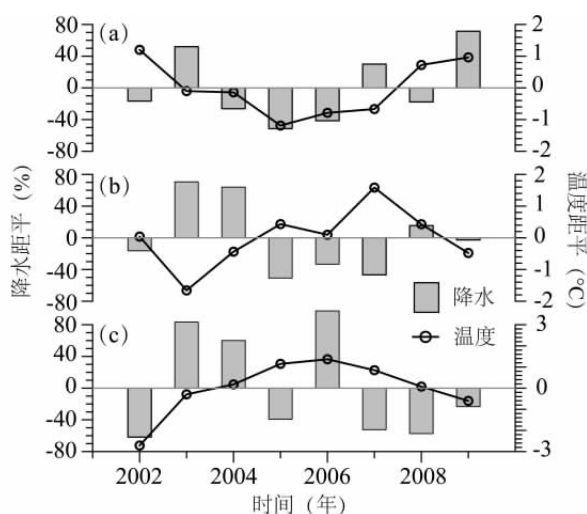


图 5 2002~2009 年锡林浩特 (a) 春季 (3~5 月)、(b) 夏季 (6~8 月) 和 (c) 秋季 (9~10 月) 的温度和降水变化 (距平参考值为 2002~2009 年的平均值)

Fig. 5 Variations in temperature and precipitation in (a) Spring (March-May), (b) Summer (June-August) and (c) Fall (September-October) during 2002~2009 in Xilinhot (reference for the anomaly is mean of 2002~2009)

4.5 地表反照率变化对气候变化的响应及其机制

李国平等^[17]指出地表反照率随着土壤表层含水量的增加 (减少) 而减小 (增加), 当土壤含水量达到饱和后, 地表反照率基本维持不变; 刘帅等^[24]曾指出典型草原区地表反照率随着草覆盖度的增加 (减小) 而减小 (增加)。本文揭示出的地表反照率季节变化过程印证了这些科学结论, 自春至夏随着温度的上升和降水量的增加, 草覆盖度逐渐增加, 地表反照率逐渐降低, 自夏至秋, 变化过程刚好与此相反。

在年际尺度上温度和降水的变化能对草的生长状况造成明显的影响, 比如 Lotsch^[29]和何勇等^[18], 那么这些影响是否进一步影响到地表反照率了呢? 表 2 显示, 可见光波段反照率变化与温度变化或降水变化有显著的相关关系, 相关程度的高低依季节和分析时段而异。生长季初期的反照率与同期温度有显著负相关关系, 相关系数达 -0.67 (95% 的置

信水平)，与同期降水的相关关系不显著，而与前 2~3 个月至同期的总降水量有显著负相关关系（95%的置信水平）。生长季盛期的反照率与同期的温度和降水均没有显著的相关关系，与此前 1~3 个月的平均温度也没有显著的相关关系，与此前 1~3 个月的降水量有显著的负相关关系，相关系数为-0.46~-0.54（99%的置信水平）。生长季末期的反照率与同期温度和降水量均没有显著相关关系，与前 2~3 月平均温度有显著正相关关系，相关系数为 0.53~0.63（95%的置信水平），相对而言，与前 1~2 个月至同期总降水量的相关程度更高，相关系数达-0.67~-0.76（99.9%的置信水平）。不仅如此，地表反照率极端的异常也与气候要素的极端异常有关，其中以 2002 年和 2003 年最为典型。图 4 显示地表反照率在 2002 年极端偏大，这与当年降水偏少相对应；地表反照率在 2003 年异常极端偏低，这与当年降水极端偏多相对应。

表 2 可见光波段反照率的年际变化与同期及前期温度和降水的相关系数
Tab. 2 Correlations between variations in surface albedo in visible band and synchronous/historical temperature and precipitation

时期 \ 项目	下降期		低谷期		上升期	
	(4 月 7 日~6 月 1 日)		(6 月 20 日~8 月 28 日)		(9 月 14 日~11 月 8 日)	
	温度	降水	温度	降水	温度	降水
P3+P2+P1+P0	-0.56	-0.61*	0.42	-0.51*	0.53*	-0.61*
P3+P2+P1	-0.47	-0.55	0.26	-0.41	0.57*	-0.59*
P3+P2	-0.36	-0.18	0.24	-0.25	0.56*	-0.53*
P3	-0.29	-0.03	0.27	0.24	0.23	-0.18
P2+P1+P0	-0.62*	-0.59*	0.28	-0.54**	0.53	-0.76**
P2+P1	-0.50	-0.57	0.13	-0.53*	0.63*	-0.75**
P2	-0.29	-0.18	0.14	-0.44*	0.61*	-0.69**
P1+P0	-0.66*	-0.56	0.25	-0.46*	0.35	-0.73**
P1	0.19	-0.54	0.01	-0.23	0.41	-0.67**
P0	-0.67*	-0.23	0.31	-0.28	0.18	-0.40

注：* 表示 95%的置信水平；** 表示 99%的置信水平

由此表明，年际尺度上的温度和降水变化能够通过影响草的生长状况进而影响地表反照率。其中，温度对地表反照率的影响依季节而异，在生长季初期温度升高（降低）促使地表反照率降低（升高），其效应是即时的，在生长季末期温度对地表反照率的影响效果则完全相反，并且是滞后的，大约滞后 1~3 个月，在生长季盛期，温度对地表反照率没有影响。降水的影响效果没有季节差异，在任意时期，降水的增加（减少）均促使地表反照率降低（增加），其中在生长季末期影响程度最大，但是其影响具有滞后性，大约滞后 1~3 个月。

张戈丽等研究发现^[30]：春季草地植被生长对气温变化的敏感性较降水变化高，温度升高有利于春季物候提前，植被覆盖度增加；夏季和秋季草地植被的生长对降水变化的敏感性则高于对气温变化的敏感性，降水量增加有利于植被覆盖度增加，并且降水的影响具有一定的滞后性。刘成林等^[19]也指出，降水对植被长势的影响存在滞后性，大约滞后 2 个月。这些结论与本研究发现的温度和降水与地表反照率变化之间的关系是吻合的。

5 结论与讨论

本文在肯定了 MODIS 反演结果不仅能够很好地表征地表反照率的季节变化, 而且也能较好地反映其年际变化的基础上, 分析了中国北方典型草原地表反照率的季节变化特征和年际变化特征, 并通过相关分析诊断了这些变化与气候变化的关系, 指出气候变化直接引起地表水、热条件的改变, 使得地表植被生长状况发生变化, 地表反照率随之而变。

在本文研究区, 没积雪覆盖时可见光和近红外波段的地表反照率的年际变化幅度大致相当, 一般为 0.01~0.02, 其中夏季的年际变幅较大。此年际变化与温度和降水的变化有密切关系, 温度或降水一般能解释地表反照率年际变化 28%~58% 的方差。其中, 生长季初期地表反照率受同期温度和前 1~2 月降水量的共同影响, 温度升高(降低)、降水量增加(减少)将致使地表反照率降低(增加); 生长季盛期地表反照率仅受前 1~2 月降水量的影响, 降水增加(减少)将致使地表反照率降低(增加); 生长季末期地表反照率受温度和降水的共同影响, 温度降低(升高)、降水量增加(减少)将致使地表反照率降低(增加)。本文结论与其它关于植被覆盖与气候变化关系的研究结论一致。

本文在地表反照率对气候变化响应研究方面进行了尝试, 上述研究结论为认识地—气作用过程及其反馈关系增添了一份实证。需要说明的是, 本文采用的是分辨率为 0.05° (大约相当于 5~6km) 的 MCD43C3 数据, 而没有采用分辨率达 1km 的 MCD43B3 数据。由于前者是通过平均法对后者进行空间重采样的结果, 所以使用这两种资料计算出的研究区平均反照率的季节变化和年际变化特征可能不会有明显差异, 因而不至于影响本文关于地表反照率与气候变化关系的诊断结果。这仅仅是理论推导, 其合理性尚需要进一步研究证实。认识地—气之间的反馈关系是为了改进数值模式, 降低对未来预测的不确定性, 因此如何将本文得出的科学认识应用于数值模式, 改进其中的地表反照率参数化方案将是重要的研究方向。另外, 由于利用 MODIS 资料反演的积雪覆盖地区的地表反照率有较大误差, 本文尚未分析积雪覆盖变化导致的地表反照率变化。不可否认, 积雪覆盖面积和厚度的年际变化对地表反照率的影响远大于生长季的地表反照率变化, 探索利用其它卫星观测资料开展研究区地表反照率与地表积雪覆盖关系的研究, 也是下一步研究内容之一。

参考文献:

- [1] Charney J, Peter H S, William J Q. Drought in the Sahara: A biogeophysical feedback mechanism. *Science*, 1975, 187 (4175): 434~435.
- [2] Sud Y C, Smith W E. Influence of local land-surface processes on the Indian Monsoon: A numerical study. *Journal of Applied Meteorology*, 1985, 24(10): 1015~1036.
- [3] Meehl G A. Influence of the land surface in the Asian summer monsoon: External conditions versus internal feedbacks. *Journal of Climate*, 1994, 7 (7): 1033~1049.
- [4] Xue Y. Biosphere feedback on regional climate in tropical North Africa. *The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1997, 123(542): 1483~1515.
- [5] Oleson K W, Bonan G B, Levis S, *et al.* Effects of land use change on North American climate: Impact of surface datasets and model biogeophysics. *Climate Dynamics*, 2004, 23(2): 117~132.
- [6] 马玉堂, 姚文权, 徐兆生. 垦荒的若干小气候效应. *气象学报*, 1982, 40(3): 353~361.
- [7] Chapin F S, Sturm M, Serreze M C, *et al.* Role of land-surface changes in Arctic summer warming. *Science*, 2005, 310(5748): 657~660.
- [8] Myhre G, Kvalev g M M, Schaaf C B. Radiative forcing due to anthropogenic vegetation change based on MODIS

- surface albedo data. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(L21410).
- [9] Brovkin V, Claussen M, Driesschaert E, *et al.* Biogeophysical effects of historical land cover changes simulated by six Earth system models of intermediate complexity. *Climate Dynamics*, 2006, 26(6): 587~600.
- [10] Betts R A, Peter D F, Klein Goldewijk K, *et al.* Biogeophysical effects of land use on climate: Model simulations of radiative forcing and large-scale temperature change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142(2~4): 216~233.
- [11] Committee on Radiative Forcing Effects on Climate in National Research Council of the National Academies. *Radiative Forcing of Climate Change*. Washington, D. C. : The National Academies Press, 2005.
- [12] Grant I F, Prata A J, Cechet R P. The impact of the diurnal variation of albedo on the remote sensing of the daily mean albedo of grassland. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39(2): 231~244.
- [13] 刘辉志, 涂刚, 董文杰. 旱区不同下垫面地表反照率变化特征. *科学通报*, 2008, 53(10): 1220~1227.
- [14] 张果, 周广胜, 阳伏林. 内蒙古荒漠草原地表反照率变化特征. *生态学报*, 2010, 30(24): 6943~6951.
- [15] Minnis P, Mayor S, Smith W L, *et al.* Asymmetry in the diurnal variation of surface albedo. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(4), 879~891.
- [16] Liu W, Baret F, Gu X, *et al.* Relating soil surface moisture to reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2~3): 238~246.
- [17] 李国平, 肖杰. 青藏高原西部地面反射率的日变化以及与若干气象因子的关系. *地理科学*, 2007, 27(1): 63~67.
- [18] 何勇, 董文杰, 严晓瑜. 基于 MODIS 的我国北方农牧交错带植被生长特征. *应用气象学报*, 2008, 19(6): 716~721.
- [19] 刘成林, 樊任华, 武建军, 等. 锡林郭勒草原植被生长对降水响应的滞后性研究. *干旱区地理*, 2009, 32(4): 512~518.
- [20] 陈燕丽, 龙步菊, 潘学标, 等. 基于 MODIS NDVI 和气候信息的草原植被变化监测. *应用气象学报*, 2010, 21(2): 229~236.
- [21] 邵全琴, 赵志平, 刘纪远, 等. 近 30 年来三江源地区土地覆被与宏观生态变化特征. *地理研究*, 2010, 29(10): 1439~1451.
- [22] 张戈丽, 欧阳华, 张宪洲, 等. 基于生态地理分区的青藏高原植被覆被变化及其对气候变化的响应. *地理研究*, 2010, 29(11): 2004~2016.
- [23] 王继燕, 罗格平, 鲁蕾. 利用 TM 影像分析天山北坡三工河流域地表反照率的时空变化. *地理研究*, 2010, 29(10): 1899~1908.
- [24] 刘帅, 李胜功, 于贵瑞, 等. 不同降水梯度下草地生态系统地表能量交换. *生态学报*, 2010, 30(3): 557~567.
- [25] Wang S, Davidson A. Impact of climate variations on surface albedo of a temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142 (2~4): 133~142.
- [26] Gao F, Schaaf C B, Strahler A H, *et al.* MODIS bidirectional reflectance distribution function and albedo Climate Modeling Grid products and the variability of albedo for major global vegetation types. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110.
- [27] Schaaf C B, Gao F, Strahler A H, *et al.* First operational BRDF, albedo and nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1~2): 135~148.
- [28] Jin Y, Schaaf C B, Woodstock C E, *et al.* Consistency of MODIS surface bidirectional reflectance distribution function and albedo retrievals; 2. Validation. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D5)
- [29] Lotsch A, Friedl M A, Anderson B T, *et al.* Response of terrestrial ecosystems to recent Northern Hemispheric drought. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32
- [30] 张戈丽, 徐兴良, 周才平, 等. 近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应. *地理学报*, 2011, 66(1): 47~58.

The responses of surface albedo to climatic changes in Xilin Gol grassland

ZHANG Xue-zhen

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: This study assessed the reliability of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)-derived land surface albedo products for Xilin Gol grassland, illustrated the seasonal cycles and inter-annual variations of land surface albedo in Xilin Gol grassland, and analyzed correlations between surface albedo variations and climatic changes. The results show MODIS-derived dataset is able to capture seasonal cycle and inter-annual variations of surface albedo, though there is a difference between the MODIS-derived albedo and ground instrumental measurements. The MODIS-derived dataset illustrates that the seasonal cycle patterns of surface albedo vary with spectrum. For the visible band surface albedo, the seasonal cycle presents a “V”-shaped variation with the bottom in the first ten days of August. For the near-infrared band surface albedo, the seasonal cycle is “U”-shaped with the bottom in the period from June to September. However, both visible band surface albedo and near-infrared band surface albedo had consistent inter-annual variations. Moreover, the inter-annual variations of surface albedo were partly attributed to climatic variations. The effects of temperature were significant in the early (April to May) and late (September to November) growth season. The correlation coefficients between temperature and surface albedo were -0.67 and 0.63 in the early and late growth season, respectively. The effects of precipitation were significant through out the growth season. The correlation coefficients between precipitation and surface albedo ranged from -0.54 to -0.76. It is worthy noting that the effects of precipitation were usually lagged by 2-3 months.

Key words: grassland; surface albedo; climate change; MODIS products