

山东省森林调节温度的生态服务功能

冯海霞¹ 侯元兆² 冯仲科³

(1. 山东交通学院 济南 250023 ; 2. 中国林业科学研究院 北京 100091 ; 3. 北京林业大学 北京 100083)

摘 要 : 以山东省森林资源为研究对象 , 利用 MODIS 温度产品、植被指数产品、实际采集的外业数据、山东省第 7 次二类调查数据、山东气象数据等 , 结合 GIS 技术 , 对 2000—2006 年山东省森林不同时间的温度数据进行量化分析。结果表明 : 1) 森林夏季具有降温作用 , 冬季具有保温作用 ; 2) 夜间森林对温度的调节作用不明显 ; 3) 森林温度变化的振幅比农田、城镇都小 ; 4) 农田降温 and 保温的效果都不如森林显著 ; 5) 白天 , 在夏季 , 森林地表温度 (LST) 和归一化植被指数 (NDVI) 是负相关的关系 , 冬季是正相关的关系 ; 夜间 , 无论冬夏 , 森林的 LST 与 NDVI 几乎不存在相关性 ; 6) LST 的变化与 NDVI 的变化是负相关的关系。

关键词 : 山东省 ; 森林生态服务 ; 地表温度 ; 植被指数 ; 3S 技术

中图分类号 : S718.5 文献标识码 : A 文章编号 : 1001 - 7488(2010) 05 - 0020 - 07

Quantitative Research of Forest Ecological Service of Modulating Temperature in Shandong Province

Feng Haixia¹ Hou Yuanzhao² Feng Zhongke³

(1. Shandong Jiaotong University Jinan 250023 ; 2. Chinese Academy of Forestry Beijing 100091 ;

3. Beijing Forestry University Beijing 100083)

Abstract : Data of the Shandong Province's forest resources , including MODIS temperature , vegetation index , the field surveying data and the meteorological data in Shandong , combining with GIS , were used to study the ecological temperature regulation of forests with different tree species and in different seasons during 2000—2006 by using. The results were as the following : 1) In summer forests had a function to decrease temperature , while in winter they preserved heat ; 2) The forests did not modulate temperature overnight ; 3) The temperature change in forests was less than that in farmlands and cities ; 4) The forests had greater capacity to modulate temperature variation over seasons than farmland did ; 5) In Summer , land surface temperature , (LST) and normalized difference vegetation index (NDVI) of the daytime had a negative correlation with each other , however in winter they had a positive correlation. In evening , LST was not correlated with NDVI ; 6) the change of LST was negatively correlated with the change of NDVI.

Key words : Shandong Province ; forest ecological service ; land surface temperature ; vegetation index ; 3S technology

近年来国内外学者从生态系统过程、生态服务功能及生态经济价值等多个方面 , 对森林生态系统服务功能开展了综合研究 , 不断充实与丰富生态服务功能的内涵 , 探索其生态经济价值的评估方法及其与生态过程、空间格局的关系 (侯元兆等 , 1995 ; 李文华等 , 2006)。森林调节温度的生态服务功能是森林调节气候、净化环境的生态系统服务功能的一个方面 , 森林调节温度多是在点尺度上利用气象观测点上的数据进行研究 (吴家兵等 , 2002 ; 郭清和等 , 2005 ; 陆贵巧等 , 2006 ; 杜颖等 , 2007) , 评估方法多是采用替代法 (侯元兆等 , 1995 ; Brack , 2002 ; 彭建等 , 2005 ; 康文星等 , 2008 ; 杨锋伟等 , 2008)。

目前对森林调节温度的作用还缺乏定量化研究 , 大范围森林调节温度的研究以及实现对森林温度动态的、连续的监测还必须寻求新的手段。随着现代科技的发展 , 以 3S (GPS , GIS 和 RS) 技术为代表的新技术、新方法不断应用到森林生态服务研究中来。热红外遥感技术的飞速发展快速地为获取区域地表温度空间差异信息提供了新的途径。早在 20 世纪 60 年代发射 TIROS-II 以来 , 人们开始用卫星热红外波段测量海面温度。随着遥感技术的不断发展 , 卫星数据质量不断提高 , 利用卫星资料获取海面温度的技术逐渐趋于成熟。美国国家宇航局的 EOS 计划为温度反演精度提出的目标是 1 K , 海面

是 0.3 K。目前温度反演的算法已比较成熟(覃志豪等 2001;毛克彪等 2005)遥感温度反演已应用于城市热岛效应、城市绿地格局与城市热岛效应的关系研究(毛克彪,2007;张桂华等,2005;王雪,2006)但是应用于森林调节温湿度效应方面的研究还较少。

本研究主要利用 MODIS 温度产品、植被指数产品、实际采集的外业数据、山东省第 7 次二类调查数据、山东气象数据等,对 2000—2006 年山东省森林不同时间的温度数据进行了量化分析,对山东省森林调节温度的生态服务功能进行量化尝试,为科学地评估森林生态系统调节温度的生态服务功能提供新的技术手段和科学的数据支持。

1 研究区概况

山东省(114°47′—122°43′E,34°22′—38°23′N)位于我国东部沿海,黄河下游,土地面积总共 1 522.21 万 hm^2 ,其中林业用地面积 342.12 万 hm^2 ,活立木总蓄积为 8 627.99 万 m^3 ,森林覆盖率为 16.72%,林木绿化率为 20.68%(2007 年森林资源调查数据)。属于暖温带季风气候类型。山东省地处暖温带落叶阔叶林区,植物资源种类丰富。由于山东农垦历史悠久,原始植被早被破坏殆尽,现有森林植被均系人工林和天然次生林,林分、林层结构单一,全部为单层林,林分优势树种为毛白杨(*Populus tomentosa*)和刺槐(*Robinia pseudoacacia*),其中又以杨树占绝对优势。山东省森林在鲁中山区和胶东丘陵区分布集中,其余地区分布较散。

2 数据来源

NASA 网站免费提供多种不同等级的数据产品,考虑到地表温度(land surface temperature, LST)产品和植被指数(vegetation indices, VI)产品比较分析时要求分辨率一致、时间统一,选取了同为 Global 1 km 分辨率的 Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1 km 和 Vegetation Indices 16-Day L3 Global 1 km 产品。下载了 MODIS 2000—2006 年的 Terra 星(上午星,早晨 10:30、夜间 10:30 由北向南穿越赤道线)8 天的温度产品 MOD11 和 Aqua 星(下午星,下午 1:30、夜间 1:30 由南向北穿越赤道线)8 天的温度产品 MYD11 产品及 MODIS 2000—2006 年的 Terra 星 16 天的植被指数产品 MOD13。

2007-08-08—08-27 分 5 个组进行外业调查。每个调查组随机选取有代表性、典型、大片林区

作为样地,用角规调查蓄积量,罗盘仪测量树高,并用 GPS 测定每个样地的经纬度和海拔高度并记录地表类型。总共调查 1 456 个样地,其中林地样地 884 个,其他类型样地 572 个。

获取了 2007 年山东省第 7 次二类调查数据(无小班等的具体资料),山东省 2000 年 1:25 万土地利用现状图,2000 年森林资源分布图,山东省 20 m 分辨率的 DEM,山东省行政区划图,交通道路图,水系图证,同时收集了山东省各气象站点 2000—2006 年的气温、地温和降水等气象数据资料。

3 数据处理

首先利用 NASA 提供的投影转换工具 MRT (MODIS Reprojection Tool)对 MODIS 温度产品和植被指数产品转换投影,用山东省的边界作为 mask,获取山东省的温度数据和植被指数数据。根据质量控制层的信息去除了质量较差点的数据。

研究森林调节温度功能是按月进行的,利用 ERDAS 软件的 model 模块的建模功能,把 4 景 8 天的 LST 产品合成一景月产品。为了保证 LST 产品和 NDVI 产品的对应,合成的 LST 的月产品和 NDVI 的月产品都是 32 天一个月,1 月份包括了 1 月 31 天和 2 月第 1 天,其他的月份类推。为了与气象数据进行比较分析,把 k 氏温度转成了摄氏温度。逐月合成了 2000—2006 年白天、夜间的 LST 月产品(每个月都有 4 景月产品,分别是 Terra 星和 Aqua 星的白天和夜间过境时刻的月均值)。

MODIS 的 NDVI 产品同样利用 model 功能进行建模,把 2 景 16 天的 NDVI 产品合成一景月产品。在处理时,去除了小于 0 的值,使其范围为 0~1(负值表示地面覆盖为云、水、雪等;0 表示有岩石或裸土等;正值表示有植被覆盖,且随覆盖度增大而增大)。逐月合成了 2000—2006 白天的植被指数的月产品。

为了与 MODIS 的温度产品、植被指数产品等遥感数据保持一致,本研究全部按照 32 天一个月重新统计 2000—2006 年山东省气温、降水的月均数据。

4 数据分析

将外业样点分成了森林类样点和农田类样点,城镇样点在遥感影像上获取。利用 ArcGIS 软件获取了各样点 2000—2006 年每个月 Terra 星和 Aqua 星 4 个过境时刻的 LST 值和 NDVI 值。虽然外业采样时选择的是典型的、大片的林区,但在分辨率为 1 km 的 MODIS 温度产品里,基本上全是混合像元。

地形起伏、地类交叉等因素削弱了各类型间的差异,使得森林样点的 LST 和 NDVI 的相关性减弱了很多,但是仍然可以反映出它们的关系趋势。

表 1 和 2 列出了 2006 年样点的 LST 和 NDVI 月均数据,由于各样点的数据量较大,只列出了均值

表,且 2000—2006 年各年的数据的规律性比较一致,仅列出了 2006 年样点的 LST 和 NDVI 数据。表 1 中的城林差指的是城镇样点与森林样点月均温度的差值,最大差值指的是一年中,同类地物月均温的最大差值。

表 1 2006 年样点的 LST 均值

Tab.1 Mean LST of sample points, 2006

℃

项目 Item	样地类型 Sample plot type	月份 Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ter(MOD)白天温度 Ter(MOD) daytime LST	城镇 Town	0.17	2.64	12.12	23.89	31.95	36.25	30.82	30.21	28.70	18.9	3.55	2.55
	森林 Forest	3.10	6.29	12.85	21.55	28.94	32.93	27.73	26.98	27.90	19.84	5.42	4.44
	农田 Farmland	3.24	6.40	13.58	22.20	29.75	34.59	27.75	27.27	28.34	19.81	5.09	3.88
	城林差 Difference of town and forest	-3.07	-3.76	-1.46	1.69	2.20	1.66	3.07	2.94	0.36	-0.91	-1.54	-1.33
Aqua(MYD)白天温度 Aqua(MYD)daytime LST	城镇 Town	4.07	9.92	18.86	27.99	34.64	37.90	33.02	33.14	31.71	20.61	5.40	5.88
	森林 Forest	5.53	10.61	19.04	24.16	30.75	34.68	29.70	28.60	29.76	21.10	6.31	6.02
	农田 Farmland	6.28	10.99	20.25	24.7	31.31	36.46	30.14	28.83	30.17	21.74	5.86	5.92
	城林差 Difference of town and forest	-1.46	-0.69	-0.18	3.83	3.89	3.22	3.32	4.54	1.95	-0.49	-0.91	-0.14
Ter(MOD)夜晚温度 Ter(MOD)night LST	城镇 Town	-4.60	-1.99	5.56	8.65	16.65	21.15	22.42	18.49	16.30	8.25	-1.34	-4.97
	森林 Forest	-5.08	-2.53	5.70	7.59	15.10	19.70	21.10	17.40	15.17	7.64	-2.09	-5.76
	农田 Farmland	-5.41	-2.43	5.99	8.04	15.23	20.18	21.28	17.29	15.07	7.08	-2.42	-6.52
	城林差 Difference of town and forest	0.48	0.54	-0.14	1.06	1.55	1.45	1.32	1.09	1.13	0.61	0.75	0.79
Aqua(MYD)夜晚温度 Aqua(MYD)night LST	城镇 Town	-7.32	-3.35	0.92	7.35	14.75	19.03	21.27	16.90	15.15	6.91	-2.20	-5.11
	森林 Forest	-7.56	-3.87	0.30	6.62	13.51	17.51	20.04	15.95	14.10	6.36	-2.95	-5.35
	农田 Farmland	-7.80	-3.89	0.45	6.81	13.52	17.96	20.70	15.67	13.99	5.88	-3.42	-6.20
	城林差 Difference of town and forest	0.24	0.52	0.62	0.73	1.24	1.52	1.23	0.95	1.05	0.55	0.75	0.24

表 2 2006 年样点的 NDVI 均值

Tab.2 Mean NDVI of sample points, 2006

℃

项目 Item	月份 Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
森林 Forest	0.25	0.23	0.27	0.39	0.44	0.49	0.63	0.69	0.48	0.36	0.37	0.33
农田 Farmland	0.26	0.23	0.28	0.40	0.42	0.42	0.66	0.71	0.46	0.35	0.38	0.35

MODIS 温度产品是地温(对于植被茂密的地表,遥感反演所得到的地表温度是指植被叶冠的表面温度。对于稀疏的地表,地表温度是地面、植被叶冠等温度的混合平均值),森林调节温度通常是指气温。地温和气温之间,目前还没有可行的转换模型,但是 LST 与气温之间存在很强的联系。因篇幅关系,仅列出了气温与城镇样点白天 LST(MOD)、气温与森林样点白天 LST(MOD)的相关性(图 1),表 3 是气温与各类样点 LST 的相关系数表。

山东省气象站点观测数据的月均气温与月均地温的 $R^2 = 0.9901$ 。

气温与各类样点 LST 都存在极强的相关性,相关性最低的气温与 MYD 白天农田温度的相关系数也达 $R^2 = 0.9103$ 。气温与城镇、森林、农田样点

LST 的相关性在白天、夜间都是依次逐渐减低的;夜间,气温与各类样点 LST 的相关性都很强,相关系数最低的气温与 MOD 夜间农田温度的相关系数也高达 $R^2 = 0.9770$,而相关系数最高的气温与 MYD 夜间城镇温度的相关系数竟高达 $R^2 = 0.9927$,比气象站点观测的气温与地温的 $R^2 = 0.9901$ 的相关系数还高,说明在夜间,反演的 LST 与气温的相关性极强,基本可以代替实测数据。

城镇、森林、农田样点的 LST 的值为样点的均值,气温值也是各气象站点的均值,气温与 LST 的相关性最低值也高达 $R^2 = 0.9103$,可见气温和地温之间确实存在很强的相关性,利用 LST 分析森林调节温度服务功能是合理的。

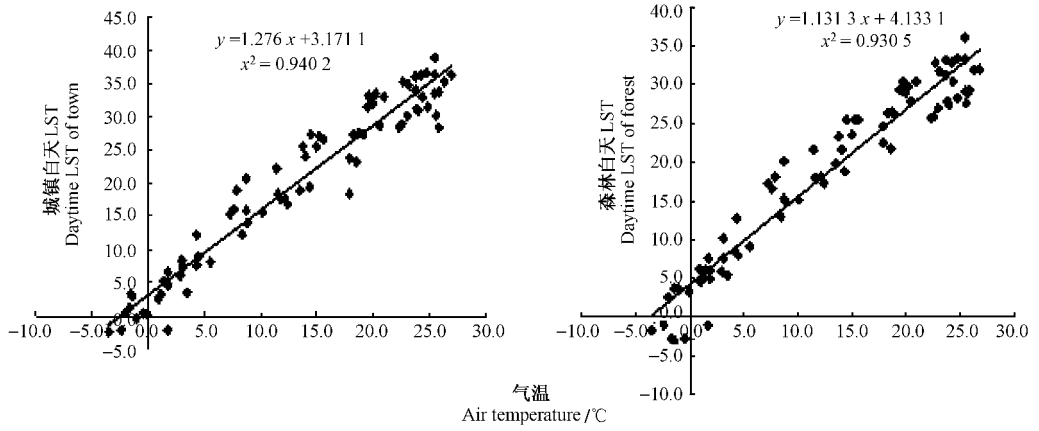


图 1 气温与城镇白天 LST (MOD)和气温与森林白天 LST (MOD)的关系
 Fig.1 Relation between air temperature and daytime LST (MOD) of town and relation between air temperature and daytime LST (MOD) of forest

表 3 气温与 LST 的相关系数

Tab.3 Correlation coefficient between temperature and LST

类别 Classes	R ²
气温与 MOD 白天城镇样点 LST Temperature and MOD daytime LST of town	0.940 2
气温与 MOD 白天森林样点 LST Temperature and MOD daytime LST of forest	0.930 5
气温与 MOD 白天农田样点 LST Temperature and MOD daytime LST of farmland	0.926 3
气温与 MOD 夜间城镇样点 LST Temperature and MOD night LST of town	0.982 4
气温与 MOD 夜间森林样点 LST Temperature and MOD night LST of forest	0.980 6
气温与 MOD 夜间农田样点 LST Temperature and MOD night LST of farmland	0.977 0
气温与 MYD 白天城镇样点 LST Temperature and MYD daytime LST of town	0.931 4
气温与 MYD 白天森林样点 LST Temperature and MYD daytime LST of forest	0.928 2
气温与 MYD 白天农田样点 LST Temperature and MYD daytime LST of farmland	0.910 3
气温与 MYD 夜间城镇样点 LST Temperature and MYD night LST of town	0.992 7
气温与 MYD 夜间森林样点 LST Temperature and MYD night LST of forest	0.992 4
气温与 MYD 夜间农田样点 LST Temperature and MYD night LST of farmland	0.992 2

5 森林调节温度的生态服务功能分析

以 2006 年的数据为例,森林在夏季具有降温作用,主要体现在 5—9 月份。根据 Terra 星(10:30)的数据,5—8 月森林类样点的温度比城镇低 3℃左右;Aqua 星过境时(13:30)两者的温差更大,比如 5 月,Terra 星过境时城镇与森林的温差是 3.01℃,Aqua 星过境时温差是 3.89℃,具体数据见表 1。在冬季,森林类样点的温度比城镇温度高,主要体现在 11 月至翌年 2 月份。1 月份,Terra 星过境时,城镇类样点的温度是 0.17℃,森林样点温度是 3.10℃,温差为 2.93℃,说明森林在冬季具有保温效果。冬季森林与城镇的温差比夏季小,11 月至翌年 2 月份的温差为 1~2℃,夏季 5—8 月份的温差在 3℃以上,说明森林的保温效果不如降温效果显著。

冬季,白天时,森林比城镇样点温度高,森林具有保温效果;夜间,城镇样点温度比森林样点高,森林保温作用不明显。夜间,城镇样点与森林类样点的温差皆比白天小,温差最大的也只有 1.55℃,具

体数据见表 1,即夜间森林对温度的调节作用不如白天显著。

样点温度变化的振幅表现为森林 < 农田 < 城镇,无论月变化还是年变化,无论白天还是夜间,森林温度变化的振幅都较小。以表 1 中 2006 年的数据为例:城镇温度年内变化的最大差值为 36.08℃,森林为 29.83℃,农田为 33.97℃;夜间城镇温度年内最大差值为 26.35℃,森林为 25.07℃,农田为 25.76℃。

农田同森林类似,也在夏季具有降温的作用,在冬季具有保温的作用,但是降温、保温效果不如森林明显。夏季 6 月份城镇样点的温度是 37.90℃,森林样点的温度是 34.68℃,农田样点是 36.46℃,森林样点的温度比农田低了 1.78℃;冬季 12 月份城镇温度是 2.55℃,森林是 4.44℃,农田是 3.88℃,森林温度比农田高了 0.56℃。但是 1 和 2 月份,出现了农田样点温度比森林样点高的情况,如 1 月份,城镇样点的温度是 0.17℃,森林样点是 3.1℃,农田样点的温度是 3.24℃,

农田的温度比森林高出了 $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}$,这与样点有关 ,农田类样点里农作物为小麦的样点占了绝大多数 ,小麦在山东属于越冬作物 ,农田类样点的 NDVI 值较高 ,森林样点里包括很多的阔叶林类样点 ,冬季 ,山东省的阔叶林落叶 ,森林样点 NDVI 的均值比农田低(表 1) ,落叶的森林对温度的调节

作用减弱。

表 4 是 2006 年 ,农田样点昼夜温差与森林样点昼夜温差的差值表 ,森林的昼夜温差一年四季都比农田小 ,在温度出现最高值的 6 月份和出现最低值的 1 月份 ,差值也最大 ,即森林温度变化的振幅较小 ,农田降温 and 保温的效果都不如森林显著。

表 4 2006 年农田与森林昼夜温差之差

Tab. 4 Temperature difference between farmland and forest 2006

项目 Item	月份 Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Terra	0.47	0.01	0.44	0.2	0.68	1.18	-0.16	0.4	0.54	0.53	0	0.2
Aqua	0.99	0.4	1.06	0.35	0.55	1.33	-0.22	0.51	0.52	1.33	0.02	0.75

6 森林地表温度(LST)和归一化植被指数(NDVI)之间的关系

以 2006 年的数据为例对 LST 与 NDVI 的相关性进行分析 ,图 2 是 2006 年 6 ,12 月份 ,Terra 星白天过境时刻 ,森林类样点白天的 LST 与 NDVI 的相关性图。

从图 2 可以看出 6 月份森林类样点白天的 LST 与 NDVI 呈负相关关系 ,即在夏季森林植被越好 ,温度越低 ,森林具有降温的作用 ;12 月份 ,森林样点白天的 LST 与 NDVI 呈正相关关系 ,即在冬季 ,森林的 NDVI 越高 ,温度也越高 ,说明森林在冬季起保温的效果。冬季森林的 LST 与 NDVI 的相关性($R^2 = 0.21$)比夏季($R^2 = 0.33$)低。山东省的森林样点中阔叶林类树种样点占了多半 ,而阔叶类树种在冬季是落叶的 ,落叶后 ,NDVI 值降低 ,蒸发、蒸腾等生命活动减弱 ,调节能力下降 ,引起冬季森林的 LST 与 NDVI 的相关性降低。样点分布于山东省范围内 ,差异较大 ,1 km 的分辨率 ,全是混合像元 ,降低了 2

者之间的相关性 ,但是森林 LST 与 NDVI 相关性的趋势还是很明显。

图 3 是 2006 年 6 ,12 月份 Terra 星晚上过境时刻森林类样点的 LST 与 NDVI 相关性。从图 3 可见 ,在夜间 ,6 月份森林类样点的 LST 与 NDVI 的 R^2 只有 0.002 6 ,12 月份为 0.043 5 ,几乎不存在相关性。因篇幅所限 ,未列出农田类样点 LST 与 NDVI 的相关性 ,规律与森林类样点类似 ,但是相关性都比森林类样点低 ,农田对温度的调节作用不如森林显著。

以 2000 年的山东省土地利用图为基础 ,利用 ArcGIS 软件 ,读出林地和灌木林在 2000 年 6 和 12 月份、2006 年 6 和 12 月份 Terra 星白天和夜间的温度值。图 4 是乔木林与灌木林 2000 年和 2006 年 6 月份的 LST 的差值和 NDVI 的差值的相关性。

从图 4 可见 ,LST 的变化与 NDVI 的变化是负相关的关系。但是 NDVI 的增加又与气温、降水等有着密切的联系。

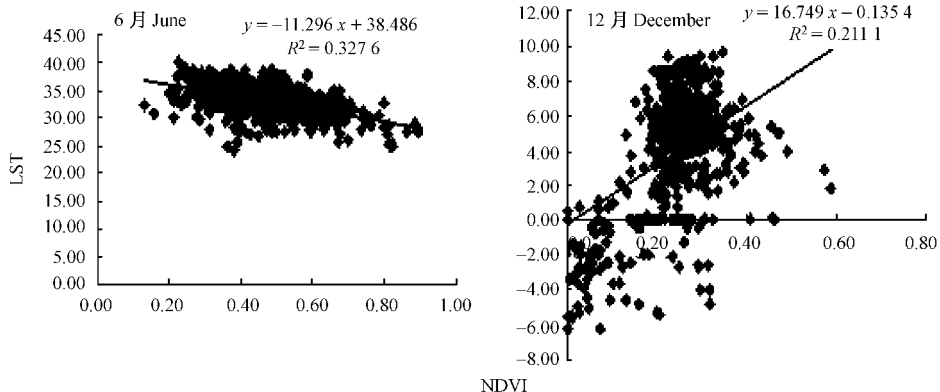


图 2 6 月和 12 月森林类样点白天 LST 与 NDVI 的相关性

Fig. 2 Relation between LST and NDVI of forest in daytime Jun. and Dec.

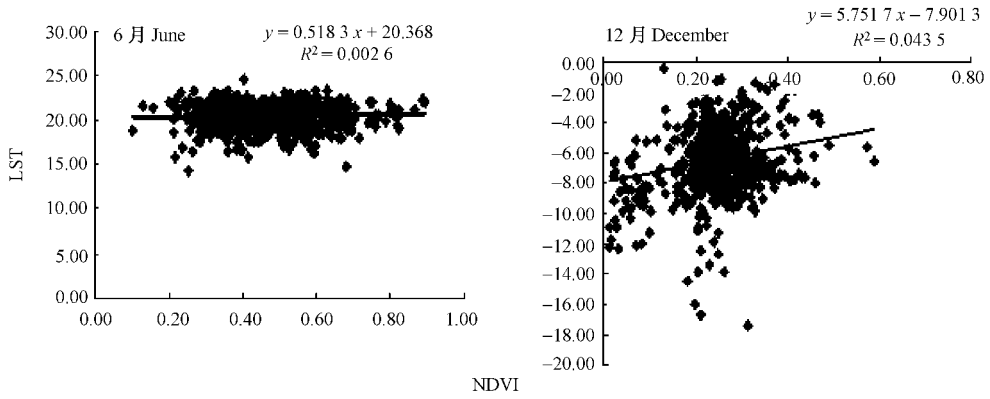


图 3 6 月和 12 月森林类样点晚上 LST 与 NDVI 的相关性

Fig. 3 Relation between LST and NDVI of forest in night Jun. and Dec.

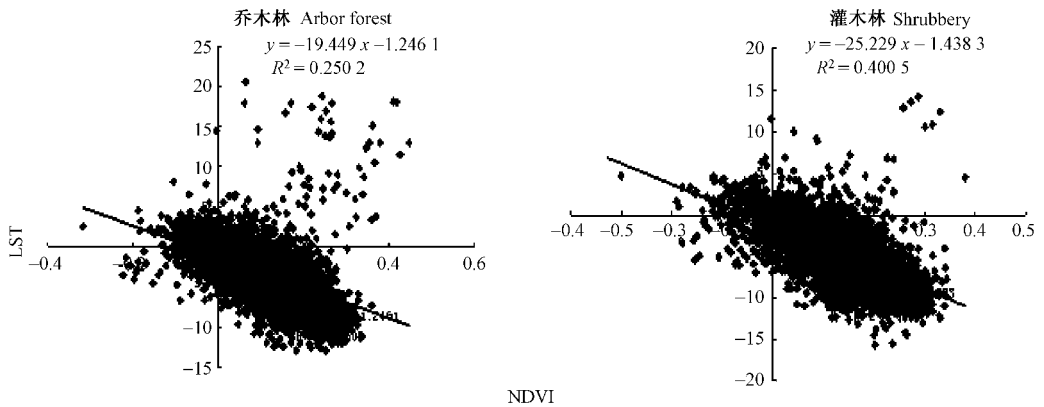


图 4 乔木林、灌木林 2000 - 06 和 2006 - 06 的 LST 差值和 NDVI 差值的相关性

Fig. 4 Relation between LST difference and NDVI difference in 2000 - 06 and 2006 - 06

7 问题及讨论

通常讲的森林调节温度的服务中的温度指的是气温,遥感反演的温度都是地表温度,虽地温与气温存在极强的相关性,但也有差别,从地温到气温目前还没有成熟的可借鉴的转换模型。森林调节温度作用的大小同树种、郁闭度、地形、时间和环境等很多因素有关系,但本研究只是对样点的温度信息和 NDVI 进行了分析,详细的数据分析仍然需要实际的地面观测数据。

山东省森林分布较集中的鲁中南山地、胶东丘陵等地区都属于低山丘陵区,目前的遥感温度反演算法没有考虑高程的影响,高程对 LST 的影响值得探讨。MODIS 温度产品的分辨率为 1 km,在山东省范围内都是混合像元,很难找到纯林,森林调节温度的能力在分析时被削弱。

本研究利用遥感数据,结合外业调查数据,得到的立足于统计的规律,对定量评估森林生态服务功能提供了科学依据和新的技术手段,没有涉及森林调节温度的原理、机制,森林调节温度机制是今后的

研究方向。

参 考 文 献

侯元兆,张佩昌,王琦,等. 1995. 中国森林资源核算研究. 北京: 中国林业出版社, 3-10.

李文华,李芬,李世东,等. 2006. 森林生态效益补偿的研究现状与展望. 自然资源学报, 21(5): 677-688.

吴家兵,关德新,代力民,等. 2002. 长白山阔叶红松林夏季温度特征研究. 生态学杂志, 21(5): 14-17.

郭清和,康文星. 2005. 杉木人工林的温湿效应. 中南林学院学报, 25(3): 12-17.

陆贵巧,谢宝元,谷建才,等. 2006. 大连市常见绿化树种蒸腾降温的效应分析. 河北农业大学学报, 29(2): 65-67.

杜颖,关德新,殷红,等. 2007. 长白山阔叶红松林的温度效应. 生态学杂志, 26(6): 787-792.

彭建,王仰麟,陈燕飞,等. 2005. 城市生态系统服务功能价值评估初探——以深圳市为例. 北京大学学报: 自然科学版, 41(4): 594-604.

康文星,郭清和,何介南,等. 2008. 广州城市森林涵养水源、固土保肥的功能及价值分析. 林业科学, 44(1): 19-25.

杨锋伟,鲁绍伟,王兵. 2008. 南方雨雪冰冻灾害受损森林生态系统生态服务功能价值评估. 林业科学, 44(11): 101-111.

覃志豪, Zhang Minghua, Karnieli A, 等. 2001. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法. 地理学报, 56(4): 456-466.

毛克彪,覃志豪,施建成. 2005. 用 MODIS 影像和劈窗算法反演山东半岛的地表温度. 中国矿业大学学报:自然科学版(1):46-50.

毛克彪. 2007. 针对热红外和微波数据的地表温度和土壤水分反演算法研究. 中国科学院遥感所博士论文,1-14.

王 雪. 2006. 城市绿地空间分布及其热环境效应遥感分析. 北京林业大学博士论文,88-97.

张佳华,侯英雨,李贵才,等. 2005. 北京城市及周边热岛日变化及季节特征的卫星遥感研究与影响因子分析. 中国科学 D 辑:地球科学,35(增刊 I):187-194 187.

Brack C L. 2002. Pollution mitigation and carbon sequestration by an urban forest. *Envir Poll*, 116:195-200.

(责任编辑 于静娴)