

锡林河流域植被叶面积指数时空变化特征及其对地形因子的响应

段利民^{1,2}, 李玮^{1,2}, 罗艳云^{1,2}, 刘廷玺^{1,2}, Buren Scharaw³, 于长翔⁴

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室, 呼和浩特 010018; 3. Application Center for System Technologies, Fraunhofer IOSB, Ilmenau 98693, Germany; 4. 通辽市水土保持局, 内蒙古 通辽 028099)

摘要:为了摸清欧亚大陆大草原重要的组成部分锡林河流域在外界环境和人类活动干扰下植被的时空变异规律及其与地形因子的响应关系,利用遥感影像数据及基于大气阻抗植被指数(ARVI)的统计模型,反演了1985—2015年4个典型代表年份的LAI,从长时间尺度上分析了LAI的时空变化特征以及地形因子对其空间分布格局的影响。结果表明:近30 a,锡林河流域LAI总体呈上升趋势,多年平均值为0.8~1.5,从上游至下游逐渐降低。植被恢复状况空间差异明显,主要发展态势为恢复。LAI在0.78~0.82,0.82~0.86所占面积比例随着海拔、坡度的升高而降低,在东南方向上的面积占比大于其他方向;LAI在0.92~1.5,1.5~3.0所占面积比例随着海拔、坡度的升高而增大,在西、西南方向上的面积占比大于其他方向。高程对LAI的直接影响效应为0.438,远大于坡度和坡向对LAI的影响。本研究可为草原流域陆面过程及生态水文研究提供理论基础和科学依据,对于天然生态系统的健康维持、退化生态系统的恢复重建等也具有一定的参考价值。

关键词:植被指数;地形因子;转移矩阵;趋势分析

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)03-0224-08

Spatiotemporal Variations of Vegetation Leaf Area Index and Its Response to Topographical Factors in Xilin River Basin

DUAN Limin^{1,2}, LI Wei^{1,2}, LUO Yanyun^{1,2}, LIU Tingxi^{1,2}, BUREN Scharaw³, YU Changxiang⁴

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural

University, Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia Water Resource Protection and Utilization Key

Laboratory, Hohhot 010018, China; 3. Application Center for System Technologies, Fraunhofer IOSB,

Ilmenau 98693, Germany; 4. Tongliao Bureau of Soil and Water Conservation, Tongliao, Inner Mongolia 028099, China)

Abstract: Xilin River Basin is a main component of Eurasia steppe land, whereas the vegetation heterogeneity is noticeable affected by external environment and human activities. Vegetation leaf area index (LAI) is the key parameter which decides the exchanges of substance and energy between steppe ecosystem and atmosphere, and can directly describe the growth status of vegetation. Remote sensing and statistical model based on atmospherically resistant vegetation index (ARVI) were applied to retrieve the LAI of 4 typical years of 1985—2015. The spatiotemporal variations of LAI and its spatial distribution affected by topographical factors were analyzed. The results indicated that: (1) in recent 30 years, the LAI showed the increasing trend with average annual mean value of 0.8 to 1.5, and decreased from upstream to downstream; (2) the spatial heterogeneity of vegetation restoration was obvious, the main development trend was restoration; (3) the area percentages of LAI ranging from 0.78 to 0.82 and from 0.82 to 0.86 decreased with the increasing of altitude and slope, and the proportion of the area in the southeast was greater than the other directions; LAIs

收稿日期:2018-06-17

修回日期:2018-08-23

资助项目:国家自然科学基金青年基金(51509131);国家国际科技合作专项(2015DFA00530);内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2015BS0514);内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY064);教育部创新团队发展计划(IRT_17R60);科技部重点领域创新团队(2015RA4013)资助

第一作者:段利民(1982—),男,内蒙古锡盟人,博士,副研究员,主要从事干旱区生态水文教学和科研工作。E-mail:dlm@imau.edu.cn

通信作者:罗艳云(1985—),女,河南滑县人,博士,副教授,主要从事遥感生态水文教学和科研工作。E-mail:luo_yanyun@163.com

ranging from 0.92 to 1.5 and from 1.5 to 3.0 increased with the increasing of altitude and slope, and the proportion of the area in the west and southwest was greater than the other directions. The direct effect of elevation on LAI was 0.438, which is far greater than that of slope and aspect. This study provides theoretical and scientific basis for land surface processes and eco-hydrological researches, and also can be used for the healthy maintenance of natural ecosystem as well as the restoration of degraded ecosystem.

Keywords: vegetation index; topographical factors; transition matrix; trend analysis

植被是陆地生态系统的关键组成部分,通过光合、呼吸和蒸腾等生物物理过程实现土壤—植被—大气间的物质、能量和动量交换^[1]。叶片是植被进行光合、呼吸等作用的主要载体,对其进行定量描述(如 LAI)是开展地球系统碳、氮、水循环模拟等研究的关键^[2]。LAI 通常被定义为单位地表面上绿叶总面积的一半^[3],用于表征叶片的疏密程度和冠层结构特征^[4-5],是植被生态模型和陆面过程模型中重要的变量和参数^[6-11]。遥感是目前获取 LAI 最有效快捷的方式,其中,光学遥感在空间覆盖和观测频率等方面优势明显,是用于估算长时间序列 LAI 最常用的数据源^[12-13]。植被实际 LAI 与通过遥感地表反射率所计算的 LAI 存在很强的正相关性,直接将地表反射率表示为 LAI 的经验函数,在小区域内可以获得较高精度的 LAI^[2]。植被指数通过几个波段的比值或经归一化处理,在突出植被信息的同时,可减小冠层阴影、土壤背景、大气污染和角度效应等影响^[14]。

就目前而言,研究多集中在植被 LAI 的反演方法和单一年份 LAI 的空间分布特征^[15-22],缺少采用长时间跨度的高分辨率遥感影像,对 LAI 时空变化特征进行定量分析。另外,以往的研究多是从降水和温度方面研究外部环境条件对 LAI 时空变化的影响^[6,21],将地表形态这一重要环境因子考虑在内的研究还很少见。为提高生态和陆面过程等模型模拟预测结果的可靠性,减小陆地生态系统碳源汇估算的不确定性,十分有必要深入研究 LAI 的时空特征、变化规律及其影响因素等。

在近几十年,由于气候变化和人类活动的不断加剧,锡林河流域草原“三化”面积占草原总面积的比例高达 75%,草原质量下降,生产力降低,严重影响当地牧民的生产生计,严重威胁我国北方城市特别是京津冀地区的生态安全^[22]。本文利用 Landsat 系列 30 m 分辨率影像,基于 ARVI 统计模型的 LAI 反演算法,生成 1985—2015 年中 4 期(1987 年、1995 年、2006 年、2015 年)代表不同年代的 LAI 数据集,对近 30 a 锡林河流域 LAI 的时空变化特征和规律进行分析,并探究 LAI 空间分布格局对地形因子的响应。以期草原型流域生态系统均衡发展以及抵御和减少极端生态恶化等提供科学依据。

1 数据来源与方法

1.1 研究区概况

本文研究区为锡林河流域,其位于内蒙古自治区锡林郭勒盟境内,属欧亚大陆大草原地带。流域面积 1.08 万 km²,地理坐标 43°24′—44°39′N,115°25′—117°15′E,海拔 900~1 650 m,地势由东南向西北逐渐降低。地貌具有明显的成层性和分带性,南部为三级玄武岩台地,众多小型火山锥散布其间,其他区域低山丘陵和草原相间分布。植被从上游的草甸、羊草草原向下游过渡为大针茅和克氏针茅草原。在气候区划上,属温带半干旱气候,多年平均降水量约 300 mm,蒸发量达 1 900 mm(φ20 cm 口径),冬季严寒漫长、夏季温和短促。

1.2 数据及处理分析方法

Landsat 系列卫星遥感影像,覆盖周期为 16 d。利用 7 月底或 8 月初的影像可以反演锡林河流域一年中植被最大的 LAI,因为此期间是植被生长的旺盛期^[23-24]。但该时期降水较多,云雾对遥感影像的影响较大,给数据获取带来一定困难^[25]。本论文计划从 1985—2015 年中每隔 10 a 选一年作为代表年份,由于 1985 年、1986 年、2005 年 7 月和 8 月的影像云量过大,无法估算出合理的 LAI,因此,分别选择了邻近的 1987 年、2006 年,最终选用 1987 年、1995 年、2006 年、2015 年 4 个代表年份 7 月和 8 月的 Landsat TM 和 OIL 遥感影像。遥感影像从 USGS(United States Geological Survey, <http://glovis.usgs.gov/>)数据中心获取,采用 ENVI 5.3 进行几何校正、辐射校正、影像镶嵌和裁剪等处理。选取 2015 年遥感影像作为基准,对其他年份遥感影像进行几何校正,总体误差(RMS)小于 1 像元。辐射校正采用快速大气校正法,得到反射率图像,与地面观测误差相比小于 10%^[26]。数字高程数据(DEM)采用中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)的空间分辨率为 30 m 的 ASTER GDEM V2,利用 ArcGIS 10.4 软件刻画出整个锡林河流域及 15 个子流域,从上游至下游依次编号。

1.2.1 LAI 反演方法 基于 ARVI 的统计模型来反

演 LAI, 输入参数较少, 不需要复杂的运算, 因此成为利用遥感估算 LAI 的便捷且模拟效果较好的方法^[16,27]。ARVI 是 NDVI 的改进, 其使用蓝色波段矫正大气散射的影响。ARVI 值的范围是 $-1+1$, 一般绿色植被区的范围是 $0.2\sim0.8$ ^[26-27]。计算公式为:

$$ARVI = \frac{\rho_{NIR} - (2 \times \rho_R - \rho_B)}{\rho_{NIR} + (2 \times \rho_R - \rho_B)} \quad (1)$$

式中: ρ_R , ρ_B , ρ_{NIR} 分别为红色、蓝色和近红外波段的反射率。

反演 LAI 的计算公式如下:

$$LAI = 3.611 \times ARVI^2 - 1.577 \times ARVI + 0.9783 \quad (2)$$

该模型是针对内蒙古典型草原构建的定量估算草原 LAI 的有效模型, 经过由叶面积指数仪 LAI-2000 获取的实测数据检验, 适用于锡林河流域^[16]。

1.2.2 LAI 变化趋势分析方法 LAI 变化特征分析采用一元线性回归趋势线模拟, 分析每个像元在 1987—2015 年内的变化趋势, 并估计变化幅度, 模拟 LAI 的变化趋势及空间分布规律。变化趋势图反映了在 1987—2015 年, 某像元的 LAI 趋势线是这个像元用一元线性回归模拟出来总的变化趋势。slope 即是这条趋势线的斜率, 这个趋势线并不是简单的最后一年与第一年的连线。若 $slope > 0$, 说明 LAI 在 1987—2015 年的变化趋势是增加, 反之则是减少。将流域 LAI 的 slope 采用几何间隔分类法划分为 $0.10\sim0.90$, $0.05\sim0.10$, $0.00\sim0.05$ 和 $-0.90\sim0.00$, 分别对应明显恢复、中度恢复、轻度恢复和退化 4 种等级。其计算公式为^[6]:

$$slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times x_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (3)$$

式中: n 为 $1, 2, 3, \dots, n$ 的年序号; x_i 为第 i 年的某计算像元的 LAI 值。

1.2.3 LAI 变化矩阵分析方法 在不同时间段内同一区域的不同等级植被 LAI 的相互转换关系采用转移

矩阵进行分析。一般用二维表来表示, 从二维表中可以反映出各等级 LAI 间相互转化的具体情况, 例如某等级的 LAI 有多少转化成了其他等级, 某等级的 LAI 是由哪些等级的 LAI 转化而来的。根据锡林河流域 LAI 空间分布范围将其划分为 $0.78\sim0.82$, $0.82\sim0.86$, $0.86\sim0.92$, $0.92\sim1.5$, $1.5\sim3.0$ 五个等级。采用 ArcGIS 软件中面积制表工具分别计算 1987—1995 年, 1995—2006 年, 2006—2015 年三个时期 LAI 的转移矩阵。

1.2.4 地形因子对 LAI 的影响分析方法 将 4 个代表年份 5 个等级的 LAI 分别与流域的高程、坡度和坡向分级数据进行空间叠加统计, 分析各代表年不同等级 LAI 随高程、坡度和坡向的空间分布特征。

将高程按 100 m 高差划分为 5 个等级(图 1A), 分级方式和所占面积比例如下: $900\sim1\,000$ m (15%), $1\,000\sim1\,100$ m (22%), $1\,100\sim1\,200$ m (30%), $1\,200\sim1\,300$ m (20%) 和 $1\,300\sim1\,650$ m (13%)。对坡度按照 1° 间隔并将面积占比较小的等级进行合并后划分出 5 个等级(图 1B), 分级方式和所占面积比例如下: $0^\circ\sim1^\circ$ (26%), $1^\circ\sim3^\circ$ (38%), $3^\circ\sim5^\circ$ (17%), $5^\circ\sim8^\circ$ (11%) 和 $8^\circ\sim50^\circ$ (8%)。将坡向划分为东、南、西、北、东南、西南、西北和东北 8 个类型(图 1C)。针对不同的高程、坡度和坡向等级(类型), 统计各年各等级(类型) LAI 所占的面积比例(每一高程、坡度和坡向等级(类型)内各等级 LAI 面积比例和为 1), 分析在不同高程、坡度和坡向条件下, 各等级(类型) LAI 所占面积的变化趋势。

在此基础上, 采用通经分析法, 确定不同地形因子(高程、坡度和坡向)对 LAI 的影响效应。具体方法如下: 计算研究区 4 个代表年份的 LAI 平均值, 即多年平均 LAI; 提取研究区内各栅格单元的多年平均 LAI 和地形因子; 将多年平均 LAI 与地形因子进行相关分析, 得到多年平均 LAI 与各地形因子的相关系数, 进一步采用通径分析将相关系数分解为直接影响系数和间接影响系数, 进而可分析地形因子对 LAI 空间分布的影响效应。

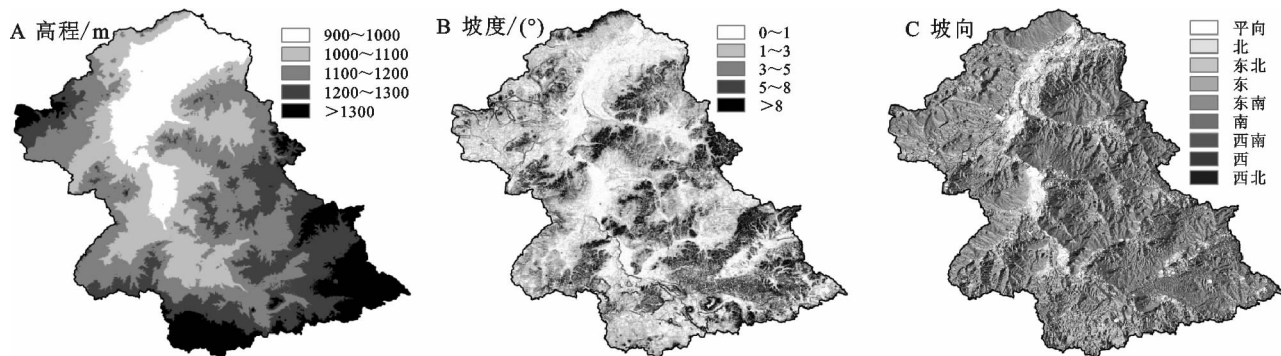


图 1 锡林河流域地形因子空间分布

2 结果与分析

2.1 LAI 时空变化特征

近 30 a 锡林河流域植被 LAI 总体呈增加趋势,增长速率为 0.068/a,多年平均值为 1.003(图 2)。1987—1995 年期间,LAI 呈增加趋势,植被生长状态有所提高,增长率为 0.012/a。1995—2006 年,LAI 呈下降趋势,植被退化,下降率为 0.005/a。2006—2015 年期间,LAI 呈增加趋势,植被长势良好,增长率为 0.018/a。

选用 1987 年、1995 年、2006 年、2015 年 4 个代表年份 LAI 的平均值来反映锡林河流域近 30 a 植被覆盖空间分布状况。由附图 10 可知,LAI 呈图斑镶嵌交错分布,自东南向西北呈带状递减。流域上游东南部地区 LAI 较高,多大于 0.92,局部地区大于 1.50。在锡林河两侧,特别是锡林河水库地区 LAI 也大于 1.50。大部分地区 LAI 在 0.82~1.50,其中 0.82~0.86 的面积占总流域面积的 28.2%,0.86~0.92 的面积占 28.8%,0.92~1.50 的面积占 25.1%。LAI 小于 0.82 的区域主要分布在下游西北部,占总流域面积的 6.4%。

由附图 11 可以看出,锡林河流域植被恢复状况在空间上存在明显的差异,明显恢复区域的面积占流域总面积的 23%(表 1),主要集中在东南部;中度恢复区域的面积仅占流域总面积的 12%;轻度恢复区域的面积占比较大,为 39%,主要集中在流域中下游;退化区域的面积占流域总面积的 26%,位于流域的南部。

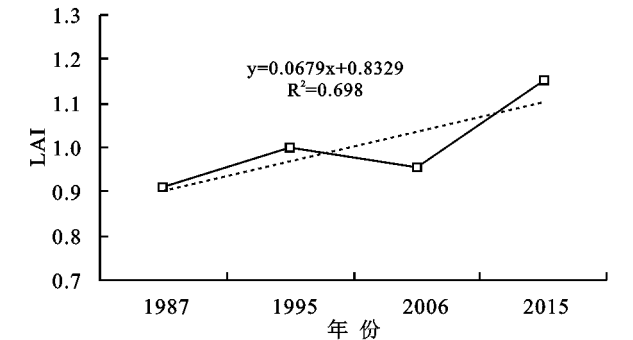


图 2 锡林河流域植被 LAI 年际变化趋势

表 1 锡林河流域植被恢复与退化面积占比

植被恢复状况	Slope	面积百分比/%
明显恢复	0.10~0.90	23
中度恢复	0.05~0.10	12
轻度恢复	0.00~0.05	39
退化	-0.90~0.00	26

2.2 不同 LAI 等级的动态变化

1987—1995 年,锡林河流域 44%的区域转向 LAI 更高的等级,主要表现为 1987 年 LAI 为 0.78~0.82 的区域转为 0.82~0.86 及 0.92~1.5,0.82~0.92 转为 0.92~1.5,0.86~0.92 转为 0.92~1.5;39%的区域保持

在原等级;仅有 18%的区域转向 LAI 低等级,如 0.82~0.86 转为 0.78~0.82,见表 2。

1995—2006 年,转向 LAI 更高等级的区域较少,仅有 25%,表现为 1995 年 LAI 为 0.86~0.92 转为 0.92~1.5;39%的区域保持在原等级;36%的区域转向 LAI 低等级,主要是 0.82~0.86 转为 0.78~0.82,0.86~0.92 转为 0.78~0.86,0.92~1.5 转为 0.78~0.92,1.5~3.0 转为 0.92~1.5。

2006—2015 年,近 50%的区域转向 LAI 更高的等级,主要表现为 2006 年 LAI 为 0.78~0.82 转为 0.82~0.86 及 0.92~1.5,0.82~0.92 转为 0.82~1.5,0.86~0.92 转为 0.92~1.5,0.92~1.5 转为 1.5~3.0;33%的区域保持在原等级;17%的区域转向 LAI 低等级,如 0.82~0.86 转为 0.78~0.82。

2.3 地形因子对 LAI 的影响

2.3.1 高程对 LAI 的影响 由图 3 可以看出,各典型年 LAI 在 0.78~0.82,0.82~0.86 所占面积比例随着海拔的升高而降低。LAI 在 0.86~0.92 所占面积比例则表现为在海拔高度 1 100~1 200 m 以下,随着海拔的升高而增大,在 1 100~1 200 m 以上时,规律则相反。LAI 在 0.92~1.5,1.5~3.0 所占面积比例随着海拔的升高而增大。当 LAI 值大于 0.92 时,分布面积随海拔的升高而增大,小于 0.92 时,规律则相反。总体看来,高程对于不同级别 LAI 的分布影响明显。

2.3.2 坡度对 LAI 的影响 由图 4 可以看出,各典型年 LAI 在 0.78~0.82,0.82~0.86 所占面积比例随着坡度的升高而降低。LAI 在 0.86~0.92 所占面积比例保持稳定,基本不受坡度的影响。当 LAI 大于 0.92 时,其所占面积比例随着坡度的升高而逐渐增大。总体看来,坡度对不同级别 LAI 的分布具有一定的影响。

2.3.3 坡向对 LAI 的影响 1987 年在各坡向上 LAI 的面积占比呈现出 0.78~0.82>0.82~0.86>0.92~1.50>0.86~0.92>1.50~3.0;1995 年、2015 年,呈现相同的趋势,即:0.92~1.50>0.78~0.82>0.82~0.86>0.86~0.92>1.50~3.0;2006 年的规律为 0.78~0.82>0.92~1.50>0.82~0.86>0.86~0.92>1.50~3.0。总体而言,LAI 等级为 0.78~0.82 的面积占比都较大,1.50~3.0 的面积占比均最小。另外,0.78~0.82,0.82~0.86 在东南方向上的面积占比大于其他方向,而 0.92~1.50,1.50~3.0 在西、西南方向上的面积占比大于其他方向(图 5)。

2.3.4 地形因子对 LAI 的影响效应 将高程、坡度和坡向 3 个地形因子与多年平均 LAI 进行相关分析,相关系数依次为:0.498,0.175,0.074,可以看出,高程、坡度与多年平均 LAI 的相关性最强。在此基

基础上,进一步利用通径分析方法研究二者对 LAI 影响的贡献率,由表 3 可知,高程对多年平均 LAI 的直接影响效应为 0.438,远大于通过坡度的间接影响效应 0.060,并且坡度通过高程对 LAI 的间接影响效应为 0.171 也大于其通过自身对 LAI 的直接影响效应 0.004。地形因子可以解释多年平均 LAI 空间变化的 75%,其中高程的对 LAI 的直接影响效应远大于坡度和坡向的影响。

表 2 锡林河流域不同等级植被 LAI 转移矩阵

年份	LAI 等级	1995 年				
		0.78~0.82	0.82~0.86	0.86~0.92	0.92~1.5	1.5~3.0
1987 年	0.78~0.82	1813(17.1)	970(9.2)	494(4.7)	816(7.7)	16(0.2)
	0.82~0.86	890(8.4)	672(6.4)	465(4.4)	778(7.4)	22(0.2)
	0.86~0.92	269(2.5)	294(2.8)	268(2.5)	653(6.2)	43(0.4)
	0.92~1.5	131(1.2)	113(1.1)	120(1.1)	1063(10.0)	353(3.3)
	1.5~3.0	1(0.0)	2(0.0)	2(0.0)	35(0.3)	298(2.8)
	LAI 等级	2006 年				
		0.78~0.82	0.82~0.86	0.86~0.92	0.92~1.5	1.5~3.0
1995 年	0.78~0.82	1569(14.8)	891(8.4)	300(2.8)	333(3.1)	11(0.1)
	0.82~0.86	924(8.7)	508(4.8)	233(2.2)	372(3.5)	13(0.1)
	0.86~0.92	506(4.8)	303(2.9)	192(1.8)	334(3.2)	13(0.1)
	0.92~1.5	592(5.6)	555(5.2)	523(4.9)	1520(14.4)	156(1.5)
	1.5~3.0	22(0.2)	29(0.3)	36(0.3)	307(2.9)	338(3.2)
	LAI 等级	2015 年				
		0.78~0.82	0.82~0.86	0.86~0.92	0.92~1.5	1.5~3.0
2006 年	0.78~0.82	1114(10.5)	885(8.4)	592(5.6)	922(8.7)	99(0.9)
	0.82~0.86	567(5.4)	499(4.7)	397(3.8)	711(6.7)	111(1.0)
	0.86~0.92	177(1.7)	189(1.8)	208(2.0)	589(5.6)	122(1.2)
	0.92~1.5	168(1.6)	203(1.9)	305(2.9)	1427(13.5)	763(7.2)
	1.5~3.0	3(0.0)	3(0.0)	166(1.6)	65(0.6)	294(2.8)

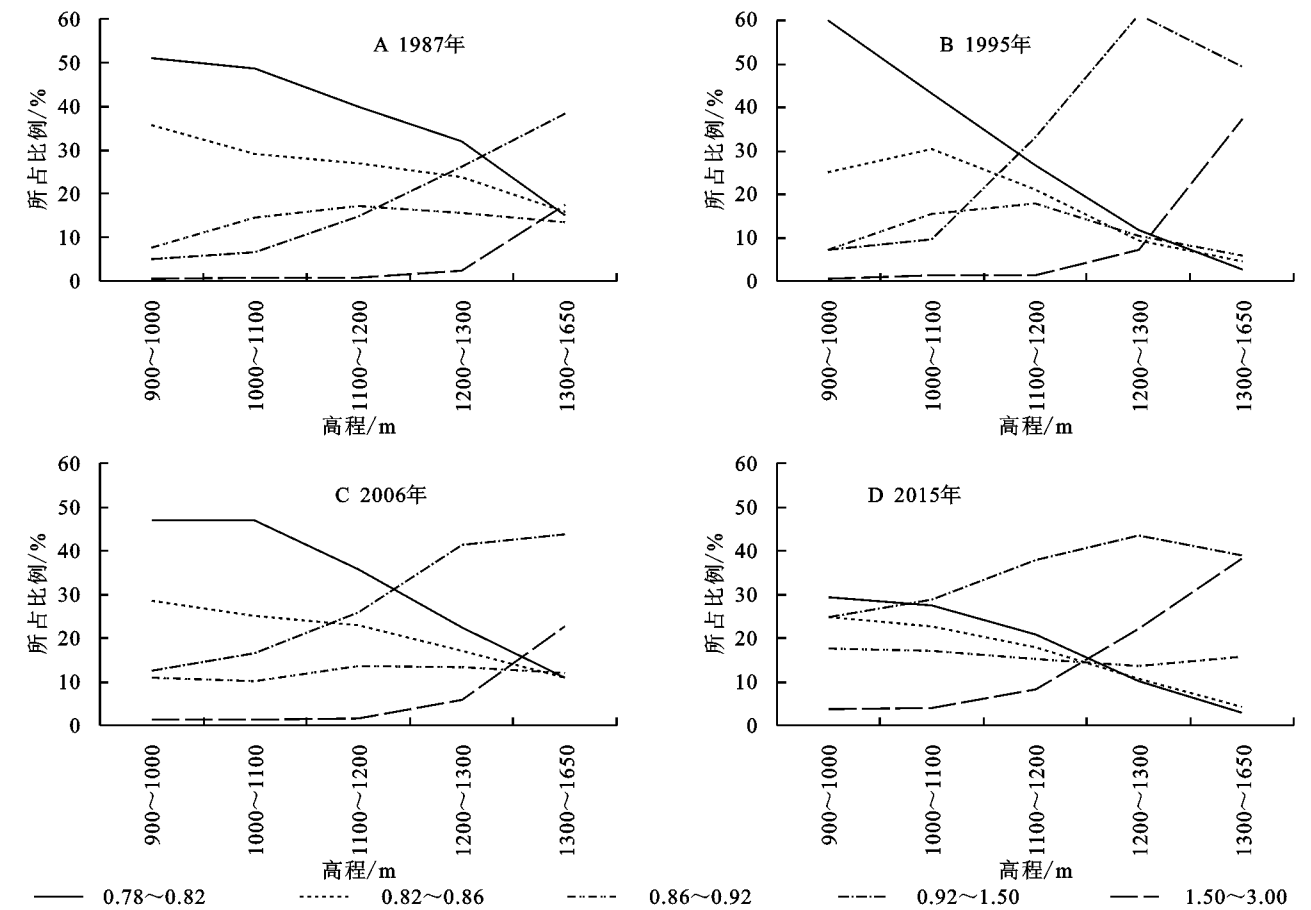


图 3 锡林河流域不同代表年份植被 LAI 随高程的变化趋势

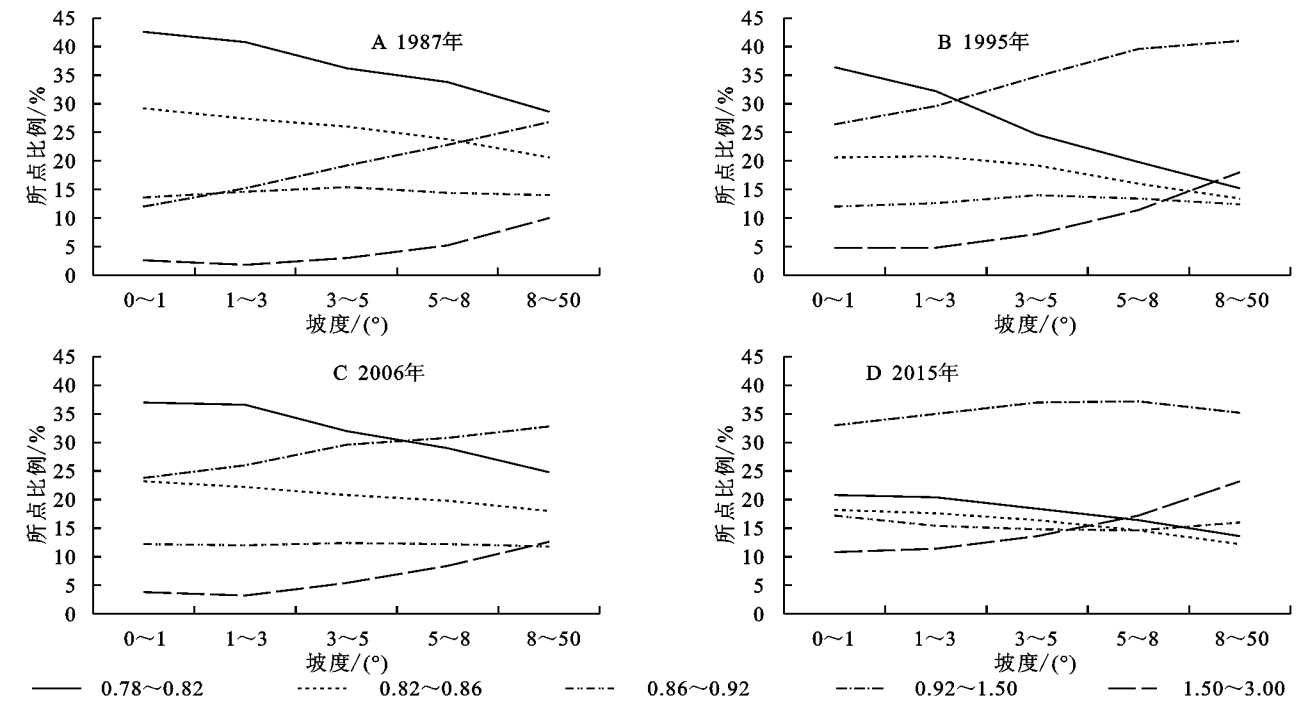


图 4 锡林河流域不同代表年份植被 LAI 随坡度的变化趋势

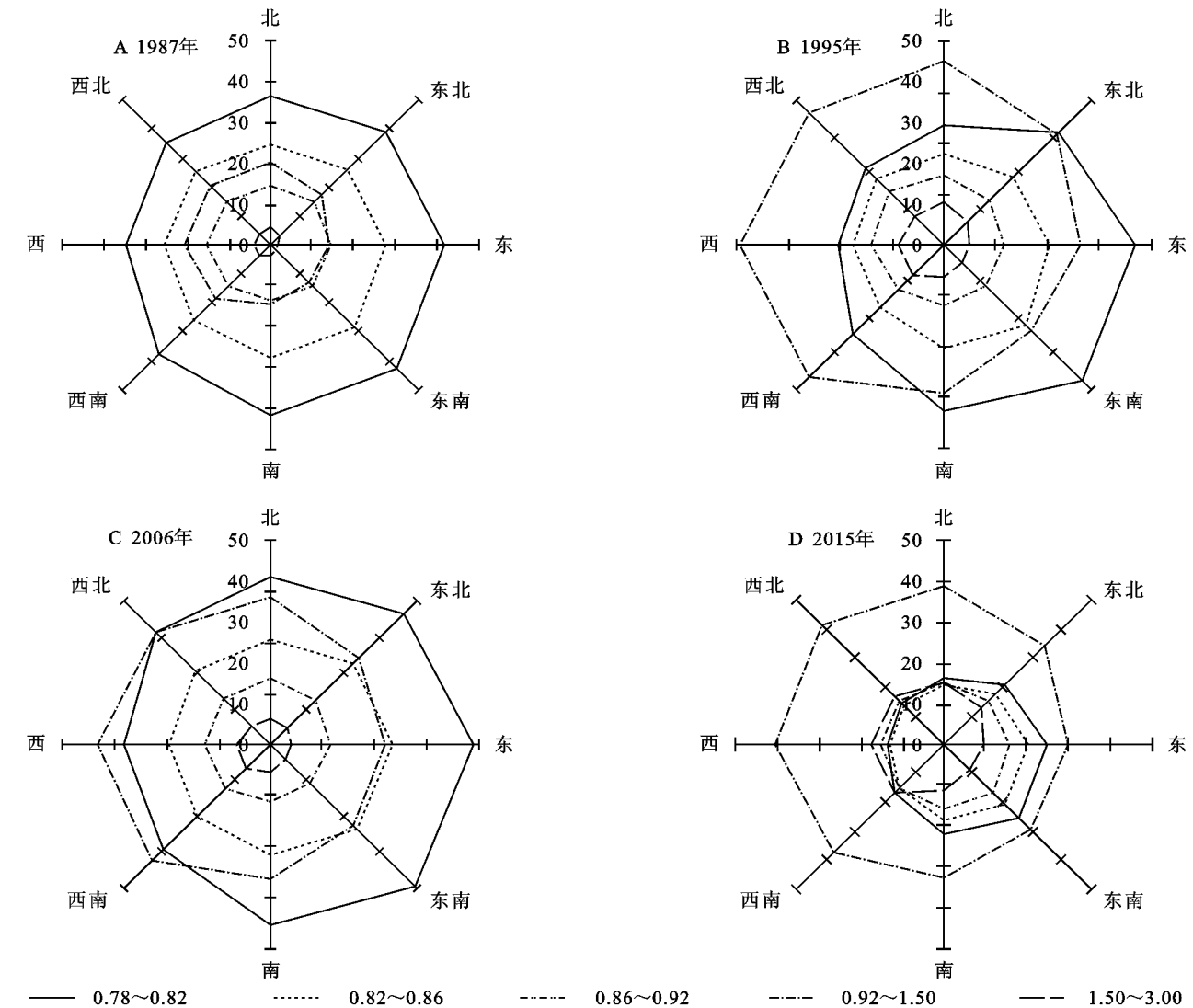


图 5 锡林河流域不同代表年份植被 LAI 随坡向的变化趋势

表 3 高程、坡度对 LAI 的影响程度

参数	直接效应	间接效应		总效应
		高程	坡度	
高程	0.438		0.060	0.498
坡度	0.004	0.171		0.175

3 讨论与结论

近 30 a 来,锡林河流域草原植被经历了 1987—1995 年向好,1995—2006 年退化,2006—2015 年变好的阶段性演变过程。尤其是在 90 年代末期,草地退化严重,生态环境急剧恶化。因此,在 2000 年之后,锡林河流域实施了“双权一制”、“围封禁牧”等生态环境保护措施。但生态环境问题具有复杂性和长期性的特点,在政策因素的引导初期 2006 年之前,环境改善不明显,随着各项政策和生态工程的持续有力实施,2006 之后牲畜数量得到了有效控制,生态环境得到很好改善^[28]。

锡林河流域 LAI 呈图斑状镶嵌交错分布,自东南向西北呈带状递减。这种空间分布规律主要受海拔、土壤特性、水分和光热等条件影响^[29-31]。研究区东南部属大兴安岭低山与中山区域,是锡林河发源地,海拔高、栗钙土层厚,水分、日照充足,植被状况最好。流域中部及锡林浩特市以下的广大地区地表大面出露火山岩、栗钙土层薄,载畜量偏高,加之锡林浩特市以下河道常年没有地表水,这些综合因素导致流域中下游地区植被状况与上游地区相差较大。

地形对锡林河流域植被长势和分布也有重要影响^[32-33]。总体而言,LAI 在 0.78~0.82,0.82~0.86 所占面积比例随着海拔、坡度的升高而降低,在东南方向上的面积占比大于其他方向。0.92~1.5,1.5~3.0 所占面积比例随着海拔、坡度的升高而增大,在西、西南方向上的面积占比大于其他方向。高程对 LAI 空间分布的直接影响程度最大,坡度的影响程度次之。

研究区植被恢复状况在空间上存在明显的差异,明显恢复的区域主要位于流域东南部,占总流域面积的 23%。退化区域的面积高达 26%,主要位于锡林浩特市上游锡林河河谷两侧及高阶地区区域。退化区域所占比例如此之高,必须引起足够的重视,因为该区域是联合国教科文组织划定的“人与生物圈计划”保护区,具有深刻的生态保护意义和国际影响力^[34-35]。但是,目前该区域载畜量仍然偏高,人类活动强度偏大。从 2016 年开始,锡林河流域自然保护区已逐步开始实施生态移民,严禁任何形式的破坏草原的活动,随着生态保护政策的逐步推进,锡林河流域生态环境将得到明显改善,植被覆盖度也将有所提高。

参考文献:

[1] Ganopolski A, Kubatzki C, Claussen M, et al. The influence of vegetation-atmosphere-ocean interaction on climate during the mid-holocene[J]. Science, 1998, 280(5371):1916-1919.

[2] 刘洋,刘荣高,陈镜明,等. 叶面积指数遥感反演研究进展与展望[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(5):734-743.

[3] Chen J M, Black T A. Defining leaf area index for non-flat leaves[J]. Plant Cell & Environment, 1992, 15(4): 421-429.

[4] Bonan G B. Forest and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests[J]. Science, 2008, 320(5882):1444-1449.

[5] Michael S, Cohen S, Maseyk K, et al. Long term and seasonal courses of leaf area index in a semi-arid forest plantation[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2011, 151(5):565-574.

[6] 柳艺博,居为民,陈镜明,等. 2000—2010 年中国森林叶面积指数时空变化特征[J]. 科学通报, 2012, 57(16): 1435-1445.

[7] 罗先香,张蕊,严登华,等. 辽宁双台子河口湿地生态水文模拟与调控[J]. 地理研究, 2011, 30(6):1089-1100.

[8] Myneni R B, Ross J, Asrar G. A review on the theory of photon transport in leaf canopies[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1989, 45(1):1-153.

[9] Arora V. Modeling vegetation as a dynamic component in soil-vegetation-atmosphere transfer schemes and hydrological models[J]. Reviews of Geophysics, 2002, 40(2):1-26.

[10] 刘凤山,陶福禄,肖登攀,等. 土地覆被变化过程中叶面积指数与降水量对地表能量平衡的贡献—基于 SiB2 的模拟结果[J]. 地理研究, 2014, 33(7):1264-1274.

[11] Leuning R, Zhang Y Q, Rajaud A, et al. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation[J]. Water Resources Research, 2008, 44(10):652-655.

[12] Zhao M, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009[J]. Science, 2010, 329(5994):940-943.

[13] Chen J M. Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 1996, 22(3):229-242.

[14] 庄东英,李卫国,武立权. 冬小麦生物量卫星遥感估测研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(10):158-162.

[15] 吴国训,阮宏华,李显风,等. 基于 MODIS 反演的 2000—2011 年江西省植被叶面积指数时空变化特征[J]. 南京林

- 业大学学报自然科学版,2013,37(1):11-17.
- [16] 杨灿灿,吴见,王春,等.基于HJ-1B影像的内蒙古草地叶面积指数反演[J].测绘工程,2015,24(5):29-32.
- [17] 郭然.中国草原生态系统生产力、碳储量与固碳潜力研究[D].北京:中国科学院研究生院,2006.
- [18] Yang P W, Tang W B, Zhou H J, et al. Mapping spatial and temporal variations of leaf area index for winter wheat in North China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2007,6(12):1437-1443.
- [19] Li Z Q, Guo X L. Leaf area index estimation in semi-arid mixed grassland by considering both temporal and spatial variations[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2013,7(1):1-17.
- [20] 张宇佳,袁金国,张莎.2002—2011年河北省植被LAI时空变化特征[J].南京林业大学学报:自然科学版,2015,39(1):86-92.
- [21] 柳艺博,居为民,朱高龙,等.内蒙古不同类型草地叶面积指数遥感估算[J].生态学报,2011,31(18):5159-5170.
- [22] 杨勇帅,李爱农,靳华安,等.中国西南山区GEOV1, GLASS和MODISLAI产品的对比分析[J].遥感技术与应用,2016,31(3):438-450.
- [23] 金云翔,徐斌,杨秀春,等.内蒙古锡林郭勒盟草原产草量动态遥感估算[J].中国科学:生命科学,2011,41(12):1185-1195.
- [24] 包云,李晓兵,黄玲梅,等.1961—2007年内蒙古降水时空分布[J].干旱区地理,2011,34(1):56-65.
- [25] 方秀琴,张万昌.叶面积指数(LAI)的遥感定量方法综述[J].国土资源遥感,2003,15(3):58-62.
- [26] Bernstein L S, Jin X, Gregor B, et al. Quick atmospheric correction code: Algorithm description and recent upgrades[J]. Optical Engineering, 2012,51(11):1-11.
- [27] 朱绪超,袁国富,易小波,等.基于Landsat 8 OIL影像的塔里木河下游河岸林叶面积指数反演[J].干旱区地理,2014,37(6):1248-1256.
- [28] 刘玉琴,沙晋明,余涛,等.基于宽波段和窄波段植被指数的草地LAI反演对比研究[J].遥感技术与应用,2014,29(4):587-593.
- [29] 孙小龙,刘朋涛,李平,等.近三十年来锡林郭勒草原植被NDVI指数动态分析[J].中国草地学报,2014,36(6):23-28.
- [30] 杭玉玲,包刚,包玉海,等.2000—2010年锡林郭勒草原植被覆盖时空变化格局及其气候响应[J].草地学报,2014,22(6):1194-1204.
- [31] 姜晔,毕晓丽,黄建辉,等.内蒙古锡林河流域植被退化的格局及驱动力分析[J].植物生态学报,2010,34(10):1132-1141.
- [32] 韩砚君,牛建明,张庆,等.锡林河流域近30年草原植被格局动态及驱动力分析[J].中国草地学报,2014,36(2):70-77.
- [33] 常学礼,吕世海,冯朝阳,等.地形对草甸草原植被生产力分布格局的影响[J].生态学报,2015,35(10):3339-3348.
- [34] 陈宝瑞,李海山,朱玉霞,等.呼伦贝尔草原植物群落空间格局及其环境解释[J].生态学报,2010,30(5):1265-1271.
- [35] 呼延俊奇,肖静,于博威,等.我国自然保护区功能分区研究进展[J].生态学报,2014,34(22):6391-6396.

~~~~~

(上接第223页)

- [17] 张山清,普宗朝,李新建,等.气候变化对天山北坡经济带设施农业气候适宜性的影响[J].中国农业气象,2016,37(5):495-504.
- [18] 赵玲,杨青,安沙舟.天山山区1961—2010年面雨量分布及变化特征[J].沙漠与绿洲气象,2013,7(2):20-24.
- [19] 苗运玲,李如琦,卓世新.天山北坡东段GPS反演的大气可降水量变化特征及其与降水的关系[J].干旱气象,2016,34(6):989-994.
- [20] 管延龙,王让会,李成.天山北麓1963—2010年0 cm最高与最低地表温度变化特征[J].干旱气象,2015,33(4):578-594.
- [21] 武胜利,刘强吉.近50 a新疆巴州地区气温与降水时空变化特征[J].干旱气象,2016,34(4):610-616.
- [22] 张家宝,史玉光,袁玉江,等.新疆气候变化及短期气候预测研究[M].北京:气象出版社,2002.
- [23] 任国玉,郭军,徐铭志,等.近50 a中国地面气候变化基本特征[J].气象学报,2005,63(6):942-956.
- [24] 热孜宛古丽·麦麦提依明,杨建军,刘永强,等.新疆近54年气温和降水变化特征[J].水土保持研究,2016,23(2):128-133.