

1982–2003 年内蒙古植被带 和植被覆盖度的时空变化

陈效述, 王 恒

(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)

摘要: 利用内蒙古地区 1982–2003 年遥感归一化差值植被指数 (NDVI) 数据, 对植被带进行了分时段划分, 并以典型草原植被带为例, 分析植被覆盖度时空变化及其与水热因子的关系。结果表明: 在整个研究期间, 典型草原带的面积呈增加的趋势, 荒漠草原带的面积呈减少的趋势, 森林带、森林草原带和荒漠带的面积趋势变化不明显。总体上看, 从时段 1 (1982–1987 年) 到时段 2 (1988–1992 年) 植被带进化演变的面积占优势, 从时段 2 (1988–1992 年) 到时段 3 (1993–1998 年) 进化和退化演变的面积相当, 从时段 3 (1993–1998 年) 到时段 4 (1999–2003 年) 退化演变的面积占优势。在典型草原带内, 多年平均植被覆盖度具有明显的季节变化, 从 5 月上半月返青开始到 8 月下半月达到年最大值, 其空间演进以大兴安岭两翼为中心, 逐渐向东南的西辽河平原和向西的乌兰察布高原扩展。前期降水量与覆盖度季节增量年际变化之间呈正相关, 显著正相关的区域位于锡林郭勒高原西部和乌兰察布高原, 而气温与覆盖度季节增量年际变化的相关一般不显著。典型草原年最大覆盖度线性趋势降低与升高的面积分别占 52.6% 和 47.4%, 其中, 呼伦贝尔高原西部边缘以及大兴安岭山麓两侧的年最大覆盖度呈显著降低的趋势, 而西辽河平原西南部和努鲁儿虎山东段的年最大覆盖度呈显著升高的趋势。年降水量是影响年最大覆盖度的主要因子, 而年均温对年最大覆盖度的影响不明显。

关键词: 归一化差值植被指数; 植被覆盖度; 水热因子; 内蒙古

陆地植被是联结土壤、陆地水体和大气之间物质、能量交换的关键环节, 在陆地表面能量交换、水分循环和生物地球化学循环过程中起着至关重要的作用。植被变化与气候变化是相互作用的, 水热条件是决定植被空间分布及其变化的主要非生物因素, 反之, 植被的分布及其变化也影响着区域的气候。植被变化对气候变化的响应非常敏感, 具有明显的动态和演变的特点^[1-3]。植被的动态通常是指在植被组成和结构不发生显著改变情况下的周期性变化, 如植被的物候变化、植被覆盖度的变化、初级生产量的变化等。植被的演变通常是指植被组成和结构发生显著改变情况下的非周期性变化或长期变化, 主要表现为植被的演替和植被带的移动等。一般来讲, 植被类型空间格局的改变反映了植被结构对水热条件变化和人类活动长期作用的响应, 而植被结构的改变必然会引起植被物候、覆盖度和生产量等功能的改变, 而植被功能在适应不断变化的环境的同时, 也促进着植被结构的改变。因此, 对于植被系统来说, 确定其空间结构是研究其功能的基础。同时, 从结构和功能两方面开展研究是认识二者相互作用机理的重要途径。有鉴于此, 本文以内蒙古为研究区域, 利用遥感数据和改进的动态聚类方法, 进行分时段植被带划分, 并揭示植被带演变的空间特征, 进而以典型草原带为例, 分析植被覆盖度的动态及其与水热因子的关系。

收稿日期: 2008-07-09; 修订日期: 2008-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40671028; 40371042) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40671028; No.40371042]

作者简介: 陈效述 (1958-), 男, 北京市人, 博士, 教授, 主要从事植物物候学和气候变化响应的研究。

E-mail: cxq@pku.edu.cn

内蒙古地区位于西北内陆干旱、半干旱气候向东南沿海湿润、半湿润季风气候的过渡带。全区年平均气温在 $-5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 自东北向西南递增; 年平均降水量在 $35\sim 530\text{ mm}$ 之间, 自东向西或自东南向西北递减。受温度和水分条件的综合影响, 植被带主要表现为近经向的空间分异特征, 从东到西依次为山地针叶林和阔叶林带、森林草原带、典型草原带、荒漠草原带和荒漠带^[4]。由于该区位于我国全球气候变化最宏观的一条敏感带附近^[5], 并且近年来草原退化呈加剧的趋势, 所以, 诊断过去几十年植被带分布格局演变和典型草原覆盖度动态特征, 不仅将为评估我国温带植被结构与功能的未来变化趋势提供重要的生态安全预警信息, 而且也为组织当地有序的人类活动, 以实现农、林、牧业的可持续发展, 提供科学的决策依据。

由于遥感归一化差值植被指数 (NDVI) 对植被的生物物理特征十分敏感^[6], 且在时效、尺度等方面都具有明显的优势, 通常被用来进行区域尺度的植被分类和植被覆盖研究^[7-10]。Tucker 等^[7]在对非洲大陆土地覆盖分类的研究中, 首次对 NDVI 数据进行了主成分分析, 提取的主成分能够反映植被划分的主要因子, 并且对于分类依据的解释也具有重要的作用, 同时还压缩了计算的数据量^[11]。近年来, 利用遥感资料进行大尺度植被类型划分的研究在国内也陆续展开, 盛永伟等^[12]利用 1990 年的 AVHRR NDVI 数据, 通过动态聚类方法识别不同植被的 NDVI 时间序列, 将我国的植被分为 18 种类型; 李晓兵等^[13]采用主成分分析对 AVHRR NDVI 数据降维, 并通过动态聚类对我国植被进行了分类; 类似的遥感植被分类研究在我国东部和西北地区也有报道^[14, 15]。然而, 以往的大尺度植被分类一般都是对个别年份或多年平均状况的划分, 对植被类型空间分布格局的年代际变化特征以及不同植被类型间转化的分析, 尚未见有研究的报道。本文即以此为切入点, 结合特定植被带内覆盖度的变化, 开展季节至年代际尺度植被动态的深入研究。

1 数据来源和研究方法

1.1 遥感数据

遥感数据取自全球总量监测和模拟研究组 (Global Inventory Monitoring and Modeling Studies, GIMMS) 所收集处理的 $8\text{ km}\times 8\text{ km}$ 分辨率、15 天最大值合成的 NOAA/AVHRR NDVI 全球数据集, 每月有上、下半月两个值, 每年共 24 个值。GIMMS 数据集的处理过程包括校正遥感器的改变、传感器灵敏度随时间变化、卫星轨道的漂移和太阳高度角等对数据质量的影响。另外, 为了消除 El Chichon 和 Pinatubo 火山爆发导致的大气气溶胶对数据质量的影响, 对 1982 年 4 月到 1984 年 12 月和 1991 年 6 月到 1993 年 12 月的数据进行了进一步的校正。因此, GIMMS-NDVI 数据的质量较其他的 NDVI 数据更高, 已经广泛应用于全球及区域尺度植被动态的研究。

1.2 地图数据

内蒙古边界矢量数据源于 1:400 万国家基础地理数据中心的矢量化地形图, 已进行精确的几何校正, 主要用来从 AVHRR 遥感数据中提取内蒙古地区的数据。内蒙古地区的植被图直接从栅格化并转成与遥感数据相同投影及坐标系的 1:400 万《中华人民共和国植被图》^[16]中切出。为了尽可能消除农业植被和水体对于植被分类的影响, 从遥感影像中剔除位于河套一带的内蒙古最大的农业植被区和内蒙古最大的水域呼伦湖。

1.3 气象数据和牧草覆盖度观测数据

所用气象数据为内蒙古自治区境内 117 个气象站点 1982-2003 年的逐日平均气温和逐日降水量。为了进行遥感和气象数据的空间相关分析, 采用基于 AUSPLIN4.2 的平面平滑样条函数法, 将逐日气温和降水量数据空间插值成 $8\text{ km}\times 8\text{ km}$ 的栅格数据, 以便与遥感 AVHRR NDVI 数据的空间网格相匹配, 然后对逐日的插值数据以半个月为时间单位

计算平均气温和累积降水量,使之与遥感数据的时间尺度相匹配。此外,还采用内蒙古自治区呼伦贝尔市鄂温克旗牧业气象试验站(49°04'N, 119°42'E, 海拔 626 m) 1994-2002 年 5、6、7、8 月月末观测的牧草盖度数据,对利用遥感数据估计的典型草原植被覆盖度进行了单站的地面检验。

1.4 植被带的划分方法

将内蒙古地区 1982-2003 年的 NDVI 遥感数据分成 4 个时段,即 1982-1987 年、1988-1992 年、1993-1998 年和 1999-2003 年。为了降低 NDVI 值年际波动的影响,将任一时段内每个像元、每年 24 个半月的 NDVI 值进行年际平均。以某一像元为例,它在第 1 时段第 1 个半月的 NDVI 值即为该像元第 1 个半月 NDVI 值 6 年的平均值,依此类推。

K-Means 分类是遥感图像分类中常用的一种非监督分类方法,它在没有先验类别知识的情况下,根据图像本身的统计特征及自然点群的分布情况划分类别。该分类方法假设样本空间聚类中心的个数是预先给定的,并使聚类域中所有样本到聚类中心的距离平方和最小^[17]。参考内蒙古植被带的划分,本研究设定的聚类中心为 5 个。首先,以第 1 时段的平均 NDVI 为对象进行 K-Means 分类,共分为 5 类,并提取第 1 时段的聚类中心;其次,根据第 1 时段的聚类中心对第 2、3、4 时段的平均 NDVI 进行 K-Means 分类,这种多时段采取相同分类中心的方法,可以保障各时段间分类结果的可比性。

1.5 植被覆盖度的计算方法

采用 Gutman^[18]提出的亚像元模型计算植被覆盖度,该方法将像元分为均一像元和混合像元两种。对于均一像元,其覆盖度 $f_g = 1$,像元 NDVI 值主要受植被层状结构的影响,其表达式如下:

$$NDVI = NDVI_{\infty} - (NDVI_{\infty} - NDVI_0)e^{-kL_g} \quad (1)$$

式中: $NDVI_{\infty}$ 为 L_g 无穷大时的 NDVI 值, $NDVI_0$ 为裸土的 NDVI 值, k 为消光系数, L_g 为像元有植被覆盖部分的叶片层数。

对于混合像元,对应的亚像元结构是由植被覆盖部分与非植被覆盖部分构成,其像元 NDVI 值为植被覆盖部分 $NDVI_g$ 值和非植被覆盖部分 $NDVI_0$ 值的加权平均值,用 f_g 表示覆盖度,则

$$NDVI = f_g NDVI_g + (1 - f_g) NDVI_0 \quad (2)$$

典型草原植被覆盖度按照公式 (3) 中 f_g 与像元 NDVI 值的关系求得,其中,草原植被混合像元中植被覆盖部分的 $NDVI_g$ 值按照均一像元的公式 (2) 计算,非植被覆盖部分的 $NDVI_0$ 值为裸土的 NDVI 值,即等于 0.1^[19],据此,将 (3) 式表示为

$$f_g = \frac{NDVI - 0.1}{NDVI_g - 0.1} \quad (3)$$

式中: $NDVI_g = NDVI_{\infty} - (NDVI_{\infty} - 0.1)e^{-kL_g}$

通常认为,草地消光系数 k 的取值范围为 $0.8 < k < 1.3$ ^[20, 21],根据对我国草地的研究,取 $k = 1$ ^[22, 23]。研究表明,当 NDVI 在 0.25~0.5 之间时, L_g 介于 1~3 之间^[18],内蒙古典型草原带平均 NDVI 为 0.4 左右,故取 L_g 为 2.5。计算植被覆盖度的区域范围为 1982-2003 年期间未发生植被带转化的典型草原带面积,每年均取带内的 NDVI 最大值作为其 $NDVI_{\infty}$ 。

为了检验典型草原植被覆盖度的遥感估算结果,利用呼伦贝尔市鄂温克旗牧业气象试验站 1994-2002 年 5、6、7、8 月月末观测的牧草盖度数据与当地像元同期草原植被覆盖度的估算数值做了相关分析,结果表明,计算值与观测值相关显著 ($r = 0.5269$, $P < 0.01$),且拟合直线的斜率接近于 1 ($y = x$),说明计算内蒙古地区典型草原覆盖度时所取的参数 k 和 L_g 是合理的,计算结果可信。

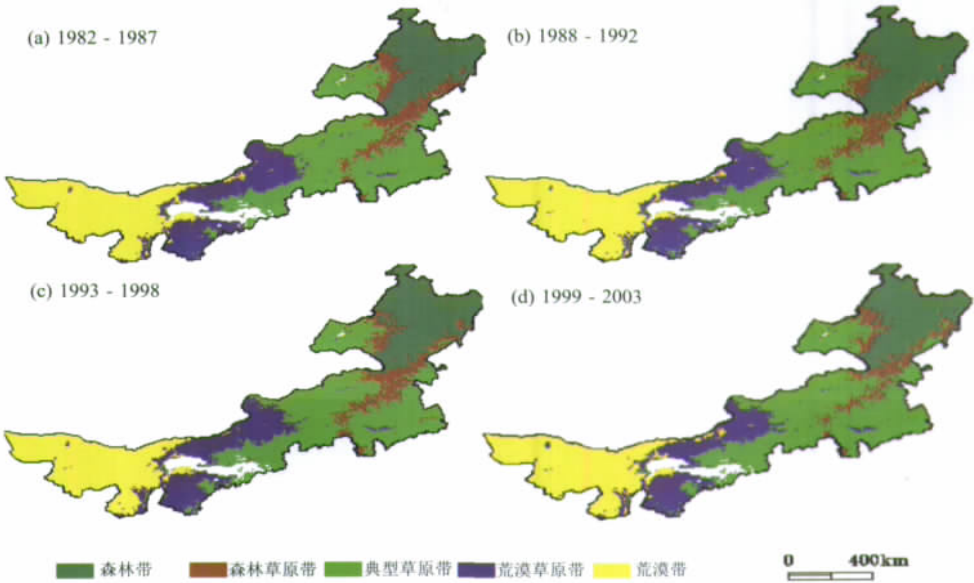


图 1 内蒙古地区植被带的四时段遥感划分

Fig. 1 Remote sensed classification of vegetation belts according to four periods of time in Inner Mongolia

2 内蒙古植被带的演变

从利用遥感数据的植被带划分结果可以看出 (图 1)，内蒙古地区的植被呈自东北向西南近经向的分布格局，依次为森林带、森林草原带、典型草原带、荒漠草原带和荒漠带，与《内蒙古植被》^[4]中根据实地考察得到的植被地带分布基本吻合，表明上述植被带划分结果的可靠性。其中，本分类的森林带对应着其寒温型明亮针叶林带、中温型夏绿阔叶林带和暖温型夏绿阔叶林带；森林草原带对应着其温型森林草原亚带和暖温型森林草原亚带；典型草原带对应着其温型典型草原亚带和暖温型典型草原亚带；荒漠草原带对应着其温型荒漠草原亚带和暖温型荒漠草原亚带；荒漠带对应着其暖温型荒漠带。在 4 个时段之间，各植被带的空间分布格局和面积略有变化。

从各植被带面积占内蒙古总面积的百分比可以看出 (图 2)，典型草原带的面积最大，其次是荒漠带，森林带与荒漠草原带面积相近，森林草原带的面积最小。从各植被带面积百分数的变化来看，典型草原带面积呈递增的趋势，从第 1 时段的 36.09% 增至第 4 时段的 39.75%，平均每 10 年的递增率为 1.66%；荒漠草原带的面积总体上呈递减的趋势，从第 1 时段的 16.53% 减至第 4 时段的 13.72%，平均每 10 年的递减率为 1.28%；森林带和荒漠带的面积总体上减小，但幅度亦很小；森林草原带的面积基本稳定在 8% 左右。

如果将森林→森林草原→典型草原→荒漠草原→荒漠为顺序

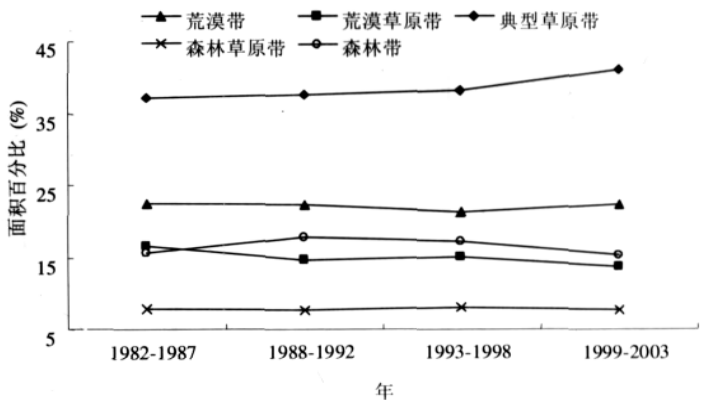


图 2 各植被带面积占内蒙古地区总面积百分比的变化

Fig. 2 Variations in percentages of the areas of vegetation belts

to the total area of Inner Mongolia

的转化定义成退化演变，而将相反顺序的转化定义成进化演变，则植被带从第 1 到第 2 时段，进化演变的像元数为 1728 个，退化演变的像元数只有 184 个，前者是后者的 9.4 倍；森林和典型草原的像元数增加，其中，森林面积的增加主要来自森林草原，典型草原面积的增加主要来自荒漠草原。从第 2 到第 3 时段，进化演变的像元数为 787 个，退化演变的像元数为 612 个，二者相差不多；荒漠草原、典型草原和森林草原的像元数增加，其中，荒漠草原面积的增加主要来自荒漠和典型草原，典型草原面积的增加主要来自荒漠草原和森林草原，森林草原面积的增加主要来自森林和典型草原。从第 3 到第 4 时段，进化演变的像元数只有 333 个，而退化演变的像元数达到 1410 个，后者是前者的 4.2 倍；荒漠和典型草原的像元数增加，其中，荒漠面积的增加主要来自荒漠草原，典型草原面积的增加主要来自森林草原和荒漠草原。

上述植被带之间的转化反映了各种植被空间分布格局的变化，但尚不能体现带内植被功能特征的改变。为此，以内蒙古地区面积比例最大且面积的趋势变化最为显著的典型草原带作为对象，以植被覆盖度作为衡量植被功能的指标，进一步分析草原植被功能的时空变化特征及其与水热因子的关系。

3 典型草原植被覆盖度的动态

3.1 植被覆盖度的季节动态

对内蒙古典型草原区牧草返青、展叶和黄枯的观测表明，牧草通常在 4 月中、下旬返青，5 月初展叶，9 月上、中旬黄枯。对 NDVI 曲线特征的分析显示，在返青初始阶段，雪盖等其他环境干扰会对 NDVI 值造成影响，而在黄枯期，尽管覆盖度没有明显减小，但仍会导致 NDVI 的下降。可见，NDVI 与覆盖度之间相关关系较好的时段是在绿叶期，据此，将植被覆盖度变化的分析期间限于 5-8 月。按照覆盖度 f_g 的大小进行分级，以 $f_g \leq 20\%$ 为极低覆盖度， $20\% < f_g \leq 40\%$ 为低覆盖度， $40\% < f_g \leq 60\%$ 为中覆盖度， $60\% < f_g \leq 80\%$ 为高覆盖度， $f_g > 80\%$ 为极高覆盖度。在此基础上，考察典型草原带多年平均覆盖度季节动态的时空特征。

在 5 月上半月，典型草原带 93% 的面积处于极低覆盖度(图 3)。到 5 月下半月极低覆盖度的面积占 53%，主要分布在呼伦贝尔高原的西南部、昭乌达高原、西辽河平原、锡林郭勒高原西部和乌兰察布高原；低覆盖度的面积占 47%，主要分布在大兴安岭的东西两侧。6 月上半月极低覆盖度的面积减少到 25%，主要分布在锡林郭勒高原西部和西辽河平原的局部地区；低覆盖度的面积达到 67%，分布在呼伦贝尔高原、锡林郭勒高原东部、昭乌达高原和西辽河平原的大部分地区；中覆盖度的面积占 8%，出现在大兴安岭山麓地带。到 6 月下半月，极低覆盖度的面积进一步缩小，占 7% 左右，分布在靠近荒漠草原的边缘地带；低覆盖度的面积占 65%；中覆盖度的面积迅速增至 28%，范围向西扩展到呼

表 1 相邻时段植被带间相互转化的像元数

Tab. 1 The pixel number transformed among vegetation belts between two sequential periods

时段 1-2	荒漠	荒漠草原	典型草原	森林草原	森林
荒漠	5338	153	2	0	0
荒漠草原	89	3392	567	0	0
典型草原	0	33	8582	475	0
森林草原	0	0	35	1377	533
森林	0	0	0	27	3799
时段 2-3	荒漠	荒漠草原	典型草原	森林草原	森林
荒漠	5173	254	0	0	0
荒漠草原	23	3329	226	0	0
典型草原	0	112	8909	163	2
森林草原	0	0	198	1537	144
森林	0	0	1	279	4052
时段 3-4	荒漠	荒漠草原	典型草原	森林草原	森林
荒漠	5155	41	0	0	0
荒漠草原	262	3183	250	0	0
典型草原	0	105	9205	24	0
森林草原	0	0	561	1400	18
森林	0	0	1	482	3715

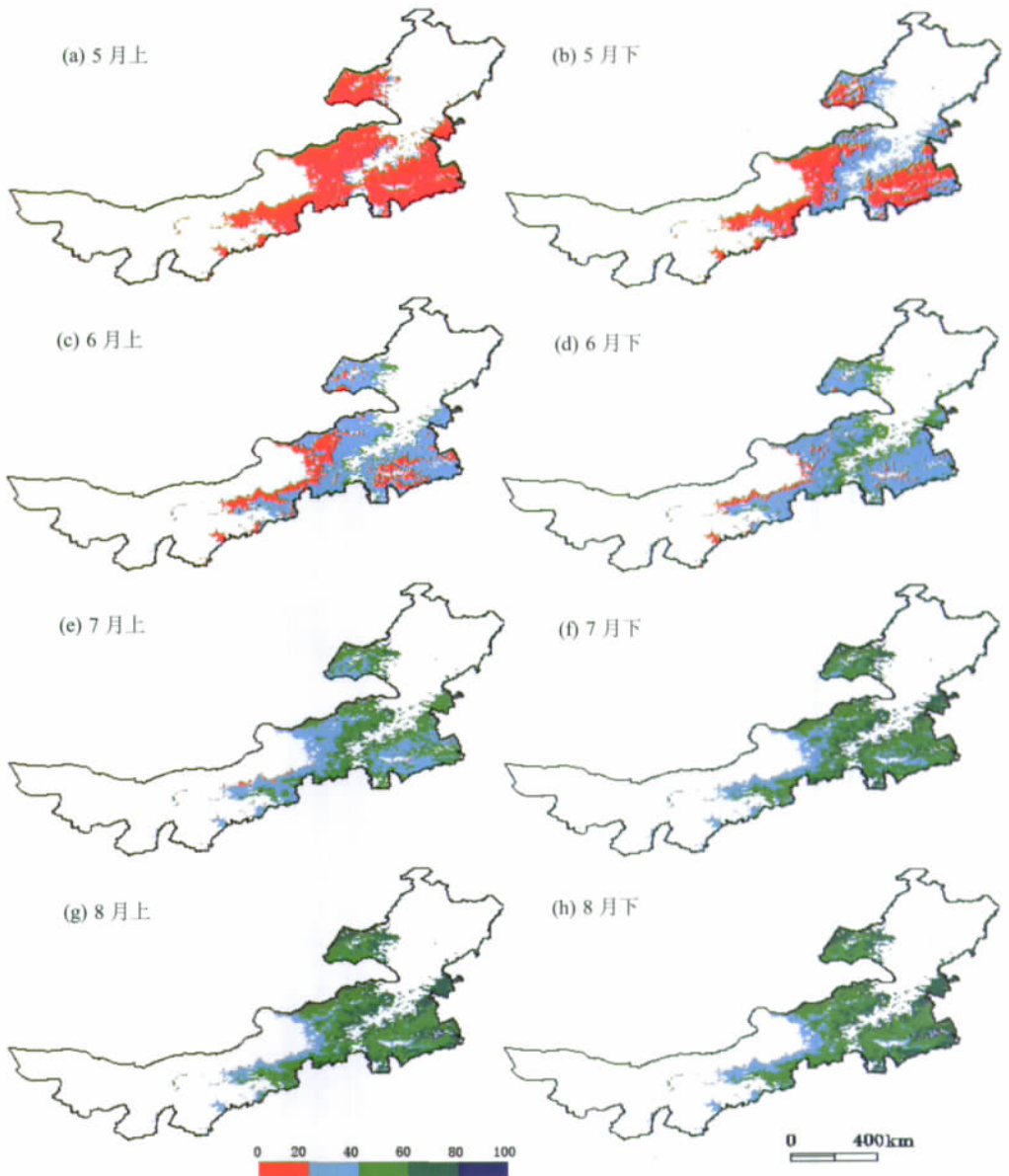


图 3 典型草原 5-8 月多年平均植被覆盖度 (%) 的空间演进

Fig. 3 Spatial progressions of annual mean vegetation cover degree (%) during May to August in the typical steppe

伦贝尔和锡林郭勒高原的东部边缘。从 7 月上半月到 8 月下半月，低覆盖度面积从 45% 迅速减至 18%，中覆盖度面积从 46% 缓慢增至 51%，高覆盖度面积则从 8% 迅速增至 30%。在 8 月下半月，植被覆盖度达到全年的最大值，但极高覆盖度的面积仍不足 1%。总体上看，典型草原带植被覆盖度从春到夏逐渐增大的空间演进过程大致以大兴安岭两翼为中心，逐渐向东南的西辽河平原和向西的乌兰察布高原扩展，这是满足草原植被生长发育的水热因子配合状况空间演进过程的一种综合反映。

3.2 植被覆盖度的多年动态

为了揭示 1982-2003 年典型草原带植被覆盖度的多年动态特征，取各像元逐年最大植被覆盖度作为指标，计算最大植被覆盖度在 22 年期间的线性趋势变化。结果表明，线性趋势集中在 0~0.01/a 和 0~0.01/a 之间，即每年递减或递增 1% 以下，分别占典型草原

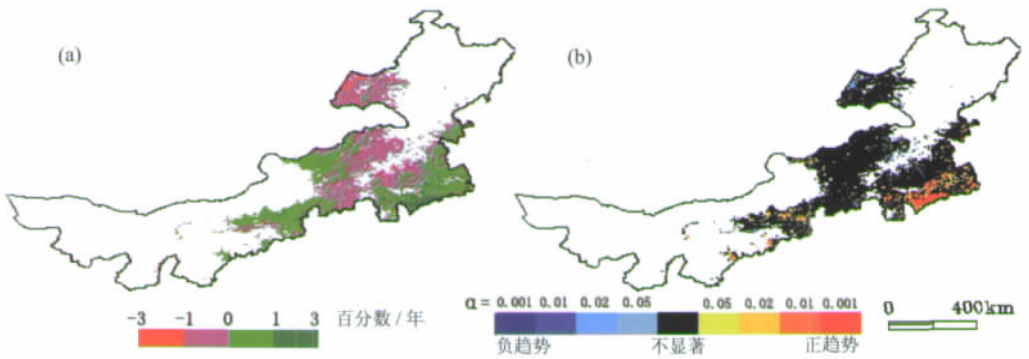


图 4 典型草原最大植被覆盖度线性趋势 (a) 及其显著性水平 (b) 的空间格局 (1982-2003)

Fig. 4 Spatial patterns of linear trends (a) and their significance levels (b) of the maximum vegetation cover degree in the typical steppe (1982-2003)

带总面积的 51.4%和 43.2%，前者主要分布在呼伦贝尔高原、锡林郭勒高原的东部、浑善达克沙地和大兴安岭南段东麓，后者主要分布在西辽河平原、昭乌达高原、锡林郭勒高原西部和乌兰察布高原。此外，还有 1.2%和 4.2%的区域最大植被覆盖度线性趋势介于 $-0.01\sim-0.03/a$ 和 $0.01\sim0.03/a$ 之间，即每年递减或递增 1%~3% (图 4a)。相关显著性检验结果显示，在呼伦贝尔高原的西部边缘以及大兴安岭两侧山麓，最大覆盖度呈显著降低的趋势 ($P < 0.01$)，表明上述地区草原的退化明显加剧；而在西辽河平原的西南部和努鲁儿虎山东段，最大覆盖度呈显著增加的趋势 ($P < 0.01$)，反映这一地区草原的生长状况明显改善 (图 4b)。

3.3 植被覆盖度与水热因子的关系

3.3.1 植被覆盖度季节增量与水热因子的关系 草原植被的季节和多年动态与水热条件的变化有着密切的联系^[9, 24-28]。在一年之内，草原植被覆盖度的季节变化具有年周期性的特点，与水热因子的年周期性变化基本一致，其年际差异主要表现为年周期曲线在时间上的平移。然而，在生长季节内的不同时段之间，草原植被覆盖度的增量却具有明显的年际波动，受到其间水热因子年际变化的影响，探讨覆盖度每半个月增量与水热条件的定量关系，将有助于从宏观层次上揭示草原植被季节性生长过程的年际变化特征及其气候成因。为此，以 Δf_{g1} 、 Δf_{g2} 、……、 Δf_{g7} 分别代表 5 月下半月对 5 月上半月覆盖度的增量、6 月上半月对 5 月下半月覆盖度的增量、……、8 月下半月对 8 月上半月覆盖度的增量，对典型草原带上述 7 种覆盖度增量的 22 年区域平均时间序列与区域平均气温和平均降水量时间序列进行相关分析。在气温和降水量时间阶段的选取时，考虑了与覆盖度增量计算时段相同、提前半个月和提前 1 个月三种情况，以便体现气候因子对于覆盖度影响的时间滞后效应，例如， Δf_{g1} 分别与 5 月下半月、5 月上半月和 4 月下半月的气温、降水量进行相关分析。

从表 2 可以看出，覆盖度增量与半个月时滞降水量的相关关系明显优于与无时滞和 1 个月时滞降水量的相关关系。在季节差异方面，以生长季节开始之初的 5 月下半月 ($P < 0.05$) 和结束之前的 8 月下半月 ($P < 0.01$) 的覆盖度增量与半个月前降水量的正相关最为显著，此外，在生长季节中期的 6 月下半月到 7 月下半月存在着一个正相关的峰值，而上述期间正处于牧草生长对水分条件响应非常敏感的返青期、旺盛光合期和生长衰退期^[27]。相比之下，覆盖度增量与气温的相关程度一般较低，并且无时滞的相关关系略优于半个月时滞和 1 个月时滞的相关关系，其中，只有 6 月下半月覆盖度增量与同期气温的负相关显著 ($P < 0.01$)。

从覆盖度增量与前期降水量相关关系的空间格局来看，二者具有显著正相关的区域

随季节的变化而不同，5 月份相关显著的中心在锡林郭勒高原西部和乌兰察布高原；6 月份移至乌兰察布高原；7-8 月覆盖度增量与前期降水量显著正相关的中心均在锡林郭勒高原的西部。

草原植被覆盖度增量年际波动对前期

降水量的滞后响应表明，前期水分状况是影响牧草季节性生长发育速率年际差异的关键环境因子，这与对北美和阿根廷草原的相关研究结论基本一致^[29-31]。由于水分条件对草原植被生长和发育的影响一般是通过降水入渗改善土壤水分状况而发生作用的^[27]，所以，土壤水分才是影响草原植被覆盖度增量变化的直接因素，而降水则是间接的因素。此外，草原植被覆盖度增量年际波动对前期降水量的响应具有明显的区域差异，表现为其影响程度在比较干旱的典型草原区西部大于比较湿润的典型草原区东部，说明水分越稀缺，草原植被覆盖度增量对降水的响应越敏感。气温仅在特定时段对草原植被覆盖度增量的变化具有显著的影响，二者之间在 6 月下半月的显著负相关关系可能是夏季气温升高加速植物的蒸腾和地表蒸发，从而使土壤水分亏缺的结果，因此，植被覆盖度增量随气温升高而减小；反之亦然。

3.3.2 年最大植被覆盖度与水热因子的关系 为了揭示典型草原带植被覆盖度总体状况的年际动态与水热因子的关系及其空间格局，选取各像元逐年年最大覆盖度、年降水量和年均温作为分析指标，结果表明，典型草原年最大覆盖度与年降水量之间以正相关为主，正相关的区域面积达到 84%，主要分布在呼伦贝尔高原、锡林郭勒高原的北部、乌兰察布高原、昭乌达高原，以及大兴安岭南段东麓和西辽河平原的北部，负相关仅出现在西辽河平原的南部和努鲁儿虎山东段(图 5a)。其中，显著正相关 ($P < 0.05$) 的面积达到 30%，出现在呼伦贝尔高原、锡林郭勒高原的北部，以及乌兰察布高原的北部边缘(图 5b)。年最大覆盖度与年均温的相关关系不如与年降水量的相关关系明显，呈正相关的区域占 52%，主要分布在锡林郭勒高原西部、西辽河平原南部和努鲁儿虎山东段，达到相关显著 ($P < 0.05$) 的区域在西辽河平原西南部，面积仅占 2.8%；呈负相关的区域占 48%，主要分布在呼伦贝尔高原、锡林郭勒高原东部、大兴安岭南段东麓和西辽河平原北部，

表 2 典型草原植被覆盖度季节增量与降水量和气温的相关系数 (1982-2003)
Tab. 2 Correlation coefficients between seasonal increment of the vegetation cover degree and seasonal precipitation/air temperature in the typical steppe (1982-2003)

植被覆盖度 增量	降水量			气温		
	无时滞	半个月时滞	一个月时滞	无时滞	半个月时滞	一个月时滞
Δf_{g1}	-0.230	0.510*	-0.033	0.385	0.027	-0.055
Δf_{g2}	0.042	0.259	-0.011	-0.211	-0.169	-0.311
Δf_{g3}	0.197	0.438*	-0.119	-0.574**	-0.050	-0.010
Δf_{g4}	0.238	0.389	-0.359	0.147	0.358	0.428*
Δf_{g5}	-0.083	0.472*	0.007	0.086	-0.095	-0.033
Δf_{g6}	-0.087	-0.048	-0.077	-0.341	0.033	0.150
Δf_{g7}	0.143	0.615**	0.154	0.005	-0.069	-0.024

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

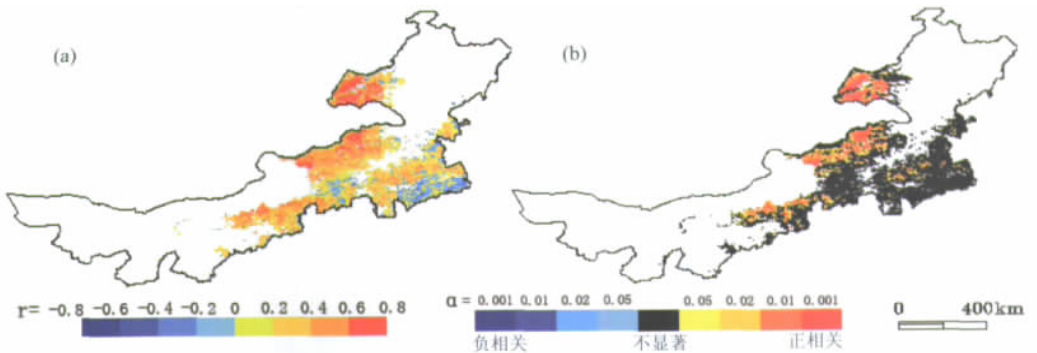


图 5 典型草原年最大植被覆盖度与年降水量的相关系数 (a) 及其显著性水平 (b) 的空间格局 (1982-2003)

Fig. 5 Spatial patterns of correlation coefficients between the annual maximum vegetation cover degree and annual

precipitation (a) and their significance levels (b) in the typical steppes (1982-2003)

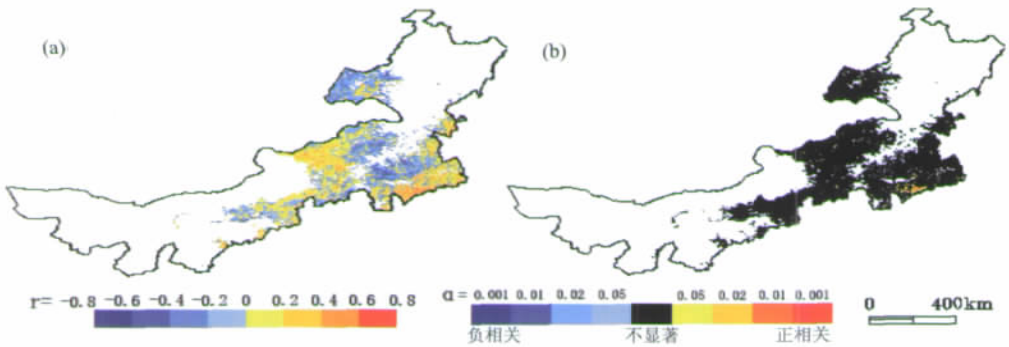


图 6 典型草原年最大植被覆盖度与年均温的相关系数 (a) 及其显著性水平 (b) 的空间格局(1982-2003)

Fig. 6 Spatial patterns of correlation coefficients between the annual maximum vegetation cover degree and annual mean air temperature (a) and their significance levels (b) in the typical steppe (1982-2003)

其中, 相关显著 ($P < 0.05$) 的区域零散分布在西辽河平原的北部和大兴安岭山麓地带, 面积仅占 1.5% (图 6)。可见, 年降水量是影响典型草原年最大植被覆盖度的主要因子, 而年均温对年最大植被覆盖度的影响不明显。这一结果与青藏高原草地植被覆盖和我国北方植被动态对气候因子响应的研究结果是一致的^[9, 26]。

4 结论

(1) 在 1982-2003 年期间, 典型草原带的面积呈增加的趋势, 荒漠草原带的面积大致呈减少的趋势, 森林带、森林草原带和荒漠带的面积趋势变化不明显。总体上看, 从时段 1 (1982-1987 年) 到时段 2 (1988-1992 年) 植被带以进化演变为主, 从时段 2 (1988-1992 年) 到时段 3 (1993-1998 年) 植被带进化和退化演变的面积相当, 从时段 3 (1993-1998 年) 到时段 4 (1999-2003 年) 植被带以退化演变为主。

(2) 典型草原带多年平均植被覆盖度具有明显的季节和年周期性变化, 从 5 月上半月返青开始到 8 月下半月覆盖度达到全年最大值。覆盖度的空间演进大致以大兴安岭两翼为中心, 逐渐向东南的西辽河平原和向西的乌兰察布高原扩展。

(3) 在 1982-2003 年期间, 典型草原带年最大覆盖度呈降低趋势的面积占 52.6%, 呈升高趋势的面积占 47.4%, 其中, 呼伦贝尔高原的西部边缘以及大兴安岭山麓两侧的最大覆盖度呈显著降低的趋势 ($P < 0.01$), 而西辽河平原西南部和努鲁儿虎山东段的最大覆盖度呈显著升高的趋势 ($P < 0.01$)。

(4) 前期降水量是影响典型草原植被覆盖度季节增量年际变化的主要气候因子, 一般来讲, 半个月前的降水量越多, 植被覆盖度的增量越大, 二者的正相关关系以生长季节初期的 5 月下半月和末期的 8 月下半月最为显著, 显著正相关的区域位于锡林郭勒高原的西部和乌兰察布高原。同期气温对典型草原植被覆盖度季节增量年际变化的影响不大。

(5) 年降水量是影响典型草原年最大植被覆盖度年际波动的主要因子, 二者正相关显著的区域位于呼伦贝尔高原、锡林郭勒高原的北部以及乌兰察布高原的北部边缘, 而年均温对年最大植被覆盖度年际波动的影响不明显。

参考文献 (References)

[1] Chen X Q, Hu B, Yu R. Spatial and temporal variation of phenological growing season and climate change impacts in temperate eastern China. *Global Change Biology*, 2005, 11: 1118-1130.

[2] Chen Xiaoqi, Yu Rong. Spatial and temporal variations of the vegetation growing season in warm-temperate eastern China during 1982 to 1999. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(1): 41-51. [陈效速, 喻蓉. 1982-1999 年我国东部暖温

- 带植被生长季节的时空变化. 地理学报, 2007, 62(1): 41-51.]
- [3] Piao Shilong, Fang Jingyun. Seasonal changes in vegetation activity in response to climate changes in China between 1982 and 1999. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 119-125. [朴世龙, 方精云. 1982-1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异. 地理学报, 2003, 58(1): 119-125.]
- [4] The Integrated Investigation Team in Inner Mongolia and Ningxia, CAS. *Vegetation of Inner Mongolia*. Beijing: Science Press, 1985. [中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古植被. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [5] Ye Duzheng (ed.) *A Preliminary Study on Global Change in China (I)*. Beijing: China Meteorological Press, 1992. 13-14. [叶笃正 主编. 中国的全球变化预研究(I). 北京: 气象出版社, 1992. 13-14.]
- [6] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8: 127-150.
- [7] Tucker C J, Townshend J R G. African land-cover classification using satellite data. *Science*, 1985, 227: 369-374.
- [8] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386: 698-702.
- [9] Yang Yuanhe, Piao Shilong. Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30: 1-8. [杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. 植物生态学报, 2006, 30: 1-8.]
- [10] Ehrlich D, Estes J E, Singh A. Applications of NOAA-AVHRR 1km data for environmental monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15: 145-161.
- [11] Yan Hao, Wang Changyao, Niu Zheng et al. Bio-implication of principal component analysis to land cover using multitemporal AVHRR data. *Remote Sensing Technology and Application*, 2001, 16: 209-213. [延昊, 王长耀, 牛铮等. 多时相 NOAA-AVHRR 数据主成分分析的生物学意义. 遥感技术与应用, 2001, 16: 209-213.]
- [12] Sheng Yongwei, Chen Weiyang, Xiao Qiangang. Macro-classification of vegetation in China using meteorological satellite vegetation index. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40: 68-71. [盛永伟, 陈维英, 肖乾广. 利用气象卫星植被指数进行我国植被的宏观分类. 科学通报, 1995, 40: 68-71.]
- [13] Li Xiaobing, Shi Peijun. Research on regulation of NDVI change of Chinese primary vegetation types based on NOAA-AVHRR data. *Acta Botanica Sinica*, 1999, 41: 314-324. [李晓兵, 史培军. 基于 NOAA-AVHRR 数据的中国主要植被类型 NDVI 变化规律研究. 植物学报, 1999, 41: 314-324.]
- [14] Li Junxiang, Da Liangjun, Wang Yujie et al. Vegetation classification of East China using multi-temporal NOAA-AVHRR data. *Journal of Plant Ecology*, 2005, 29: 436-443. [李俊祥, 达良俊, 王玉洁等. 基于 NOAA-AVHRR 数据的中国东部地区植被遥感分类研究. 植物生态学报, 2005, 29: 436-443.]
- [15] Mao Fei, Hou Yingyu, Tang Shihao et al. Classification and dynamic changes of grasslands in northern Tibet based on recent 20 years satellite data. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18: 1745-1750. [毛飞, 侯英雨, 唐世浩等. 基于近 20 年遥感数据的藏北草地分类及其动态变化. 应用生态学报, 2007, 18: 1745-1750.]
- [16] Institute of Botany, CAS. *Vegetation Map of China (1:4000000)*. Beijing: China Cartographic Publishing House, 1979. [中国科学院植物研究所. 中国植被图 (1:4000000). 北京: 中国地图出版社, 1979.]
- [17] Pan Jiangang, Zhao Wenji, Gong Huili. The research of remote sensing image classification methods. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2004, 25: 86-91. [潘建刚, 赵文吉, 宫辉力. 遥感图像分类方法的研究. 首都师范大学学报(自然科学版), 2004, 25: 86-91.]
- [18] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA-AVHRR data for use in numerical weather prediction models. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19: 1533-1543.
- [19] Fang Jingyun, Piao Shilong, He Jinsheng et al. Activity of vegetation in China has been augmented in recent 20 years. *Science in China (Series C)*, 2003, 33: 161-173. [方精云, 朴世龙, 贺金生等. 近 20 年来中国植被活动在增强. 中国科学(C 辑), 2003, 33: 554-565.]
- [20] Baret F, Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and Apar assessment. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 35: 161-173.
- [21] Choudhury B J, Nizam U A, Sherwood B I et al. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 50: 1-17.
- [22] Chen Jin, Chen Yunhao, He Chunyang et al. Sub-pixel model for vegetation fraction estimation based on land cover classification. *Journal of Remote Sensing*, 2001, 5: 416-423. [陈晋, 陈云浩, 何春阳等. 基于土地覆盖分类的植被覆盖率估算亚像元模型与应用. 遥感学报, 2001, 5: 416-423.]
- [23] Li Xiaobing, Chen Yunhao, Shi Peijun et al. Detecting vegetation fraction coverage of typical steppe in northern China based on multi-scale remotely sensed data. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45: 1146-1156.
- [24] Zhang Jun, Ge Jianping, Guo Qingxi. The relation between the change of NDVI of the main vegetational type and climatic factors in the northeast of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21: 522-527. [张军, 葛剑平, 国庆喜. 中国东

- 北地区主要植被类型 NDVI 变化与气候因子的关系. 生态学报, 2001, 21: 522-527.]
- [25] Nezlina N P, Kostianoyb A G, Li B L. Inter-annual variability and interaction of remote-sensed vegetation index and atmospheric precipitation in the Aral Sea region. *Journal of Arid Environments*, 2005, 62: 677- 700.
- [26] Li Xia, Li Xiaobing, Chen Yunhao et al. Temporal responses of vegetation to climate variables in temperate steppe of northern China. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31: 1054-1062. [李霞, 李晓兵, 陈云浩 等. 中国北方草原植被对气象因子的时滞响应. *植物生态学报*, 2007, 31: 1054-1062.]
- [27] Chen Xiaoqiu, Zhou Meng, Zheng Ting et al. Examining seasonal variations of *Leymus chinensis* photosynthetic rates in the Hulunbeier Grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28: 2003-2012. [陈效速, 周萌, 郑婷 等. 呼伦贝尔草原羊草光合速率的季节变化. *生态学报*, 2008, 28: 2003-2012.]
- [28] Chen Xiaoqiu, Zheng Ting. Spatial pattern of aboveground biomass and its climatic attributions in typical steppe of Inner Mongolia. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28: 369-374. [陈效速, 郑婷. 内蒙古典型草原地上生物量的空间格局及其气候成因分析. *地理科学*, 2008, 28: 369-374.]
- [29] Goward S N and Prince S D. Transient effects of climate on vegetation dynamics: Satellite observations. *Journal of Biogeography*, 1995, 22: 549-563.
- [30] Yang W, Yang L, Merchant J W. An assessment of AVHRR/NDVI-ecoclimatological relations in Nebraska, U.S.A. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(10): 2161-2180.
- [31] Yahdjian L, Sala O E. Vegetation structure constrains primary production response to water availability in the Patagonian Steppe. *Ecology*, 2006, 87(4): 952-962.

Spatial and Temporal Variations of Vegetation Belts and Vegetation Cover Degrees in Inner Mongolia from 1982 to 2003

CHEN Xiaoqiu, WANG Heng

(College of Urban and Environmental Sciences, MOE Laboratory for Earth Surface Processes, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data in Inner Mongolia during 1982 to 2003 were used to classify the vegetation belts in four time periods and reveal spatial shifts of the vegetation belts between two sequential periods. Then, we analyzed the spatial and temporal variations of the vegetation cover degree and its relation to thermal-moisture factors taking the typical steppe belt as an example. During the study period, the area of the typical steppe belt showed an increasing tendency, whereas the area of the desert steppe belt indicated a decreasing tendency. Otherwise, areas of the forest belt, the forest steppe belt and the desert belt did not represent any apparent tendency. Generally speaking, an evolution succession of vegetation belts was dominant during period 1 (1982-1987) to period 2 (1988-1992), whereas a degradation succession of vegetation belts (following succession orders of forest→forest steppe→typical steppe→desert steppe→desert) was dominant during period 3 (1993-1998) to period 4 (1999-2003). In between, evolution and degradation successions of vegetation belts were counterbalanced during period 2 (1988-1992) to period 3 (1993-1998). A significantly positive correlation appeared in the western part of the Xilingol Tableland and the Ulanqab Tableland. In contrast to precipitation, the correlation between the vegetation cover degree increment and air temperature was less significant. From 1982 to 2003, areas with decreasing and increasing linear trends of the annual maximum vegetation cover degree accounted for 52.6% and 47.4% of the entire Inner Mongolia, respectively, of which significantly decreasing trends appeared at the western edge of the Hulun Buir Tableland and the both sides of the Da Hinggan Mountains.

Key words: NDVI; vegetation cover; thermal-moisture factors; Inner Mongolia