

DOI: 10.5846/stxb201501290245

肖洋, 欧阳志云, 王莉雁, 饶恩明, 江凌, 张路. 内蒙古生态系统质量空间特征及其驱动力. 生态学报, 2016, 36(19): 6019-6030.

Xiao Y, Ouyang Z Y, Wang L Y, Rao E M, Jiang L, Zhang L. Spatial patterns of ecosystem quality in Inner Mongolia and its driving forces analysis. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6019-6030.

## 内蒙古生态系统质量空间特征及其驱动力

肖 洋<sup>1,2</sup>, 欧阳志云<sup>1,\*</sup>, 王莉雁<sup>1,2</sup>, 饶恩明<sup>1,2</sup>, 江 凌<sup>1,2</sup>, 张 路<sup>1,2</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院研究生院, 北京 100039

**摘要:** 植被作为生态系统的重要组成部分, 联结着大气、水分和土壤等自然过程, 其变化将直接影响该区域气候水文和土壤等状况, 是区域生态系统质量变化的重要指示器。植被状况的好坏, 主要通过生物量和植被覆盖度因子来表示。内蒙古自治区是我国北方生态环境问题十分严重的省份, 弄清当前区域生态系统质量状况与变化及其近 10 年来变化的驱动因素, 对分析与制定区域生态环境保护决策具有十分重要的意义。基于 2000—2010 年生物量和植被覆盖度, 并结合地区植被区划数据, 对内蒙古植被生态系统质量状况进行分析, 并评估其与气候(降水、温度)、人类活动(交通密度、农业发展、生态恢复工程)的相关关系, 在此基础上探讨了气候和人类活动对近年来内蒙古生态系统质量变化的影响。结果表明:(1) 内蒙古生态系统质量状况整体偏低, 其中森林生态系统平均质量最高, 灌丛、草原生态系统次之。空间分布呈明显的经度地带性, 由东向西, 质量逐渐降低。2000—2010 年内蒙古生态系统质量总体上呈现缓慢增长趋势, 但局部地区生态系统质量仍存在恶化, 其中在 107°E 以东的草原和森林区域, 生态系统质量变化十分剧烈。(2) 近 10 年来内蒙古生态系统质量的变化与气候和人类活动的关系非常密切, 其与降水、GDP1、化肥施用量、天保工程和退耕还草工程呈现明显的正相关。而与温度、道路密度和京津风沙治理工程呈现明显的负相关。其中, 生态保护工程实施区域内和区域外的相关性存在显著的差异性。随着内蒙古社会经济的快速发展, 人类活动对生态系统质量的影响逐渐加强, 但降水仍是该地区生态系统质量的主要影响因子。(3) 在内蒙古生态系统质量变化典型区域内, 质量的增加主要是由于降水的增加、温度的降低、农业的发展、退耕还草工程的作用和交通发展的放缓。质量的降低则是因为降水的减少、温度的增加、农业发展缓慢和交通发展的加快所致。

**关键词:** 生物量; 植被覆盖度; 生态系统质量; 气候; 人类活动

## Spatial patterns of ecosystem quality in Inner Mongolia and its driving forces analysis

XIAO Yang<sup>1,2</sup>, OUYANG Zhiyun<sup>1,\*</sup>, WANG Liyan<sup>1,2</sup>, RAO Enming<sup>1,2</sup>, JIANG Ling<sup>1,2</sup>, ZHANG Lu<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

**Abstract:** Vegetation is an important component of ecosystems, and it is involved in natural processes such as regional climate circulation, the hydrologic cycle, soil conditions, and other natural processes. It is also an important indicator of regional ecosystem quality change. Aboveground biomass and vegetation cover are important variables for describing vegetation quality and documenting ecosystem changes. Moreover, they are controlling factors in transpiration, photosynthesis, and other terrestrial processes, and are sensitive indicators of land degradation and desertification in arid and semi-arid regions. Aboveground biomass and vegetation cover have been used widely in the analysis of vegetation quality and changes. Inner Mongolia, an important province of northern China that is located mostly in arid and semi-arid

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(40901289); 国家科技支撑计划课题(2011BAC09B08-02)

**收稿日期:** 2015-01-29; **网络出版日期:** 2016-01-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyouyang@rcees.ac.cn

areas, is undergoing a process of significant warming and drying, which could lead to serious ecological problems such as land degradation and desertification. Determining the driving cause of these problems has become a focus of vegetation research. Many researchers have attributed the degradation and desertification in northern China to long-term over-grazing, extensive cutting, and widespread conversion of grassland to cropland. Other studies have found that poor climate conditions, such as drought, severe wind erosion, temperature fluctuation, and winter precipitation are the primary cause of degradation and desertification. Nevertheless, some recent studies have shown that human activities can control the degradation in selected study regions of northern China. It is necessary to investigate current ecosystem quality and its response to climatic variation and human activities for a better understanding of the accumulated consequences of changes in climate and human activities. In this study, combining remote sensing products (aboveground biomass and vegetation cover) with vegetation regionalization data, we quantified ecosystem quality in Inner Mongolia, and analyzed the effects of climate and human activities on spatial variations in quality change from 2000 to 2010. Our results indicated that overall ecosystem quality in Inner Mongolia is very low. Among the ecosystem types, the highest quality was exhibited in forest ecosystems, followed by shrub and grassland ecosystems, respectively. Ecosystem quality displayed evident spatial heterogeneities, divided according to latitude, and reduced gradually from east to west. There was a slight increase in ecosystem quality over the study period. However, degradation and desertification also existed in some regional areas. The spatial variation characteristics of ecosystem quality are formed by interactions between the influencing factors. The partial correlations among ecosystem quality and precipitation, GDP1, fertilizer, the natural forest protection project, and the returning farmland to grassland project were positive and statistically significant. By contrast, ecosystem quality was negatively correlated with temperature, road density, and the treatment of sand and wind sources. With the rapid development of the social economy of Inner Mongolia, the influence of human activities on ecosystem quality gradually increased, but precipitation was still the dominant factor that influenced the spatial variation characteristics of ecosystem quality. The main reasons for the improvement of ecosystem quality in a typical area were increasing precipitation, decreasing temperature, development of agriculture, returning farmland to grassland, and a slowing of traffic development. In addition, decreasing precipitation, increasing temperature, a slowdown of agricultural development, and a speeding up of traffic development led to degradation and desertification. These results provide specific information that may serve to strengthen the necessary public awareness about protecting and restoring ecosystems.

**Key Words:** aboveground biomass; vegetation cover; ecosystem quality; climatic interaction; human activities

植被作为生态系统的重要组成部分,联结着大气、水分和土壤等自然过程,其变化将直接影响该区域气候、水文和土壤等状况,对区域能量循环及物质的生物化学循环具有重要的影响,是区域生态系统质量变化的重要指示器。目前反映植被生长状况及生长活力的因子较多,有植被归一化因子 NDVI、叶面积指数 LAI、净第一生产力 NPP、植被覆盖度 VC、生物量 Biomass 等。由于各因子所具有的生态学意义不同,所以其适用范围也存在差异。其中生物量作为生态系统中植物有机物总量,不仅是整个生态系统运行的能量基础和营养物质来源,还能反映生态系统的生态演替和人为干扰过程<sup>[1]</sup>。其中,森林地上生物量不仅能充分体现森林生态系统的质量,衡量森林生产力,也是评估森林碳收支的重要参数<sup>[2-4]</sup>。生物量在生态系统结构功能、碳储量和碳动态方面的有着广泛应用<sup>[5-8]</sup>。植被覆盖度是指植被(包括叶、茎、枝)在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比<sup>[9-10]</sup>。它是全球及区域气候模型、水土流失监测、土地沙漠化评价和分布式水文模型的重要输入参数,是描述生态系统的重要基础数据<sup>[11-13]</sup>。在分析生态系统环境状态,揭示其变化趋势方面,植被覆盖度应用广泛<sup>[14-15]</sup>。植被因子作为表征生态系统变化的综合指示器,对评价陆地生态系统质量、调节生态过程具有重要的理论和实际意义。

内蒙古位处中国北部边疆,是我国北部重要的生态屏障,同时也是我国重要的农牧业生产基地,人类活动

强度大,且大部分植被地处干旱、半干旱农牧交错带地区,生态环境脆弱,是全球气候变化最为敏感的区域之一<sup>[16]</sup>。特别是,近年来内蒙古发生着巨大的变化,经济持续快速增长、城镇化进程加快、资源开发力度的增大、生态环境受到一定的冲击,同时生态保护与建设工程(天然林保护、退耕还林还草)又在一定程度上减缓着人类活动造成的压力。这些变化必然会影响到内蒙古的生态系统质量状况,进而影响了地区经济和生态环境的可持续发展。因此,全面了解内蒙古生态系统质量状况和 10 年来的变化趋势,客观认识生态系统结构与功能,确定重点保护区域以及目前存在的潜在威胁,探讨生态系统质量变化的驱动作用,实现内蒙古的可持续发展具有重要现实意义。本研究结合内蒙古的生态环境特征,选择能有效反映森林生态系统质量的生物量因子和表征草地生态系统质量的植被覆盖度因子来评估地区生态系统质量状况的好坏。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

内蒙古地处欧亚大陆,蒙古高原的一部分,地跨 97°12′—126°04′E、37°24′—53°23′N 之间,是我国北部重要的生态屏障区(图 1)。由东北向西南斜伸,呈狭长形,东西长 2400 km,南北宽 1700 km,幅员面积 118.3 万 km<sup>2</sup>,占全国总面积的 12.3%。全区地势较高,平均海拔高度 1000 m 左右,地形以高原和山地为主,其中高原约占总面积的 53.4%,山地占 20.9%。内蒙古属于干旱、半干旱气候向东南沿海湿润、半湿润季风气候的过渡带<sup>[17]</sup>,降水呈现由东北向西南递减的趋势,年降水量为 50—450 mm;温度却呈现由东北向西南递增的趋势,年平均气温为 0—8 ℃。按照降雨量和温度的梯度变化,植被类型也自东向西划分为东部的森林 中部的草地和西部的荒漠<sup>[18]</sup>。内蒙古土地覆盖类型以草地为主,大约占到了总面积的一半以上<sup>[19]</sup>。

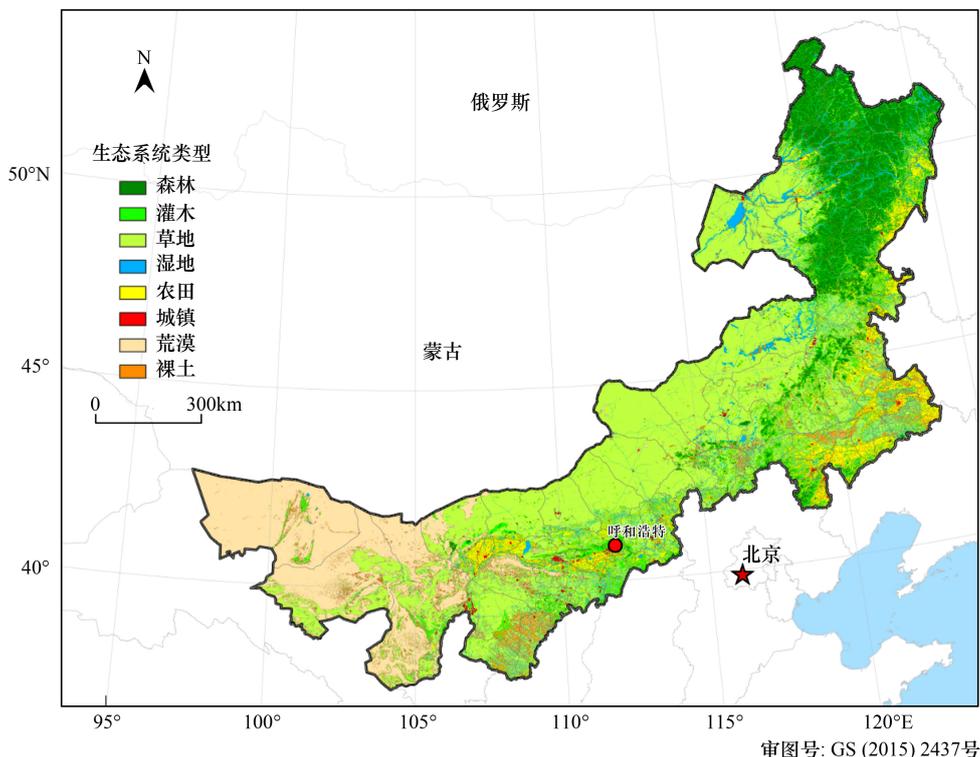


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

### 1.2 数据来源

地上生物量数据采用植被指数-生物量法(对于森林/草地生态系统)和累积 NPP 法(对于草地/农田生态系统)对植被生物量进行估算<sup>[20]</sup>。其中植被指数-生物量法是采用实地测量的植被生物量的数据和遥感数据

建立经验统计模型,然后在遥感数据的基础上反演得到区域范围内植被生物量;而累积 NPP 法是通过草地或农田的生长期(开始生长时间与结束生长时间)的确定,对生长期内的 NPP 进行累加以计算地上生物量,NPP 算法选用 CASA 模型<sup>[21]</sup>。植被覆盖度数据是基于像元二分模型<sup>[22-24]</sup>通过 Modis 影像反演得到。像元二分模型是一种简单实用的遥感估算模型,它假设一个像元的地表由有植被覆盖部分与无植被覆盖部分地表组成,而遥感传感器观测到的光谱信息也由这 2 个组分因子线性加权合成,各因子的权重是各自的面积在像元中所占的比率,其中植被覆盖度可以看作是植被的权重。生态系统类型图主要基于 LandsatTM 数据采用的面向对象的分类技术,引入非影像光谱信息强化目标的识别能力;实现快速、高效的分类技术运作。数字高程模型 DEM,空间分辨率为 90 m,来源于国际科学数据服务平台。降水与温度数据,基于局部薄盘样条函数插值理论,来源于中国国家计量信息中心/中国气象局(NMIC/CMA)。详细数据信息,见表 1。

表 1 主要数据来源

Table 1 Sources of principal data

数据名 Data name	分辨率 Data resolution	数据源 Data source
地上生物量	250m	中国科学院遥感与数字地球研究所
植被覆盖度	250m	中国科学院遥感与数字地球研究所
生态系统分类图	90 m	中国科学院遥感与数字地球研究所
SRTM 高程数据	90 m	国际科学数据服务平台
降水与温度	0.05°	中国国家计量信息中心/中国气象局(NMIC/CMA)
MODIS-NDVI(MOD13A3)	1000m	陆地过程分布式数据档案中心(LP DAAC)
全国植被区划图	1:600 万	中国科学院植物研究所
生态保护工程	县域	内蒙古政府部门
人口	县域	内蒙古统计年鉴
交通密度	县域	内蒙古政府部门
牛羊年末存栏数	县域	内蒙古统计年鉴
化肥农药施用量	县域	内蒙古政府部门
工矿面积	县域	内蒙古政府部门
社会经济数据	县域	内蒙古统计年鉴

## 2 研究方法

### 2.1 生态系统质量

本文选取地上生物量和植被覆盖度因子,结合植被区划数据,以期反映内蒙古森林和草地生态系统的状况。基于内蒙古 2000 与 2010 年生态系统分类图,结合原始森林和草地调查样方,选取各植被地带内的多个原始森林样方的生物量的均值和草地样方的覆盖度均值来代表该范围内顶级群落的生物量和覆盖度。其中,顶级群落的样方是经过设定严格的条件,如生物量高、凋落物厚、树龄高等,筛选得到。以各个地带的顶级群落的生物量和覆盖度为分母,生物量和覆盖度为分子,得到各个植被地带的生态系统质量。公式如下:

$$RBD_i = \frac{B_i}{CCB} \times 100\%$$

$$RBD_i = \frac{C_i}{CCC} \times 100\%$$

式中, $RBD_i$  为森林或草地生态系统  $i$  像元的相对生态系统质量密度; $B_i$  为森林生态系统  $i$  像元的生物量,通过遥感反演获得; $C_i$  为草地生态系统  $i$  像元的覆盖度,通过遥感反演获得; $CCB$  为森林生态系统顶级群落像元的生物量; $CCC$  为草地生态系统顶级群落像元的覆盖度;顶级群落样本均运用生态系统长期定位观测数据,或样地调查数据。

## 2.2 数据分析

### 2.2.1 变化趋势分析

为研究 10a 来我国生态系统质量变化对区域气候、人类活动变化的响应以及这种变化在时空上的差异,选用一元线性回归分析来处理多年气候和人类活动统计数据<sup>[25-26]</sup>,得到其变化趋势,计算公式为:

$$y = a + b \times t + \varepsilon$$

式中, $y$  为因变量, $t$  为年份, $a$  和  $b$  为拟合参数 ( $b$  为坡度斜率 代表趋势特征; $a$  为截距), $\varepsilon$  为残差。斜率为负值的区域,呈减小趋势;斜率为正值地区,呈增加趋势;斜率绝对值越大,变化的幅度越大,反之则变化的幅度越小。

### 2.2.2 变化相关性分析

为了探索生态系统质量与气候和人类活动之间的关系,选用皮尔逊相关性方法进行分析。其中气候因素主要考虑降水和温度,人类活动主要为放牧压力(牛羊存栏数),人口(农村和城镇人口),国内生产总值 GDP(农业生产总值 GDP1,工业生产生产总值 GDP2,服务业生产总值 GDP3),交通密度、建设用地面积、农药化肥施用量、矿区面积、生态保护工程等等。相关性分析均以县域为统计单元,在 SPSS 软件中进行。

## 3 结果与分析

### 3.1 生态系统质量时空特性

内蒙古生态系统质量整体偏低。按等分方法分类,2010 年质量为  $RBD > 80$  的生态系统占总面积的 3.1%,质量为  $60 < RBD < 80$  的占 7.8%,质量为  $20 < RBD < 40$  与  $RBD < 20$  的比例分布为 27.6% 和 39.6%。从 2010 年生态系统质量的分布可以看出(图 2),内蒙古质量总体上呈现东高西低、由东到西递减的特征。其中质量较高的区域主要分布在东部大兴安岭、呼伦贝尔草原和锡林郭勒草原。研究区 2010 年平均生态系统质量为 33.80,其中森林生态系统平均质量最高,灌丛、草原生态系统次之,空间差异明显。

森林生态系统 2010 年平均质量达到 44.83,主要包括位于呼伦贝尔高原的大兴安岭和西辽河平原的山区。地处欧亚大陆中高纬度地带的大兴安岭,受人类活动影响较少,植被组成以寒温带针叶林为主,生态系统质量多为 49.11,而处于东北平原与内蒙古高原的过渡区域的山区,是我国北方主要的农牧交错区,受人类活动影响较大,生态系统质量多为 32.26。位于温带半干旱气候带的草地生态系统,2010 年平均质量为 31.70。其中质量高的区域主要分布在呼伦贝尔草原和锡林郭勒草原。鄂尔多斯高原草地质量偏低,为 16.83。

内蒙古 2000—2010 年的生态系统质量总体上呈现增长状态,质量增加的面积约为 120900.43 km<sup>2</sup>。10a 间生态系统质量明显增加的区域主要分布在贺兰山、毛乌素沙地西部及浑善达克沙地北部地区、锡林郭勒高原西北部、科尔沁沙地东部、呼伦贝尔高原西部地区 and 东北部大兴安岭部分地区;其中锡林郭勒附近的生态系统质量增加趋势最为明显,增加面积约为 31808.01 km<sup>2</sup>(图 2)。生态系统质量明显减少的区域分布相对较集中,除少数零散分布于科尔沁沙地西部及东北部大兴安岭的部分地区外,主要沿鄂尔多斯高原-浑善达克沙地南缘-锡林郭勒高原东南部一线呈条带状分布。其中鄂尔多斯和呼和浩特附近的生态系统质量下降趋势明显,降低面积约为 34922.75 km<sup>2</sup>(图 2)。

从内蒙古生态系统质量的随经度变化规律可看出(图 3),内蒙古 2010 年生态系统质量自西向东的呈逐渐增加趋势,具有明显的经度地带性( $R^2 = 0.87, P < 0.001$ )。内蒙古生态系统质量变化方面,100°—106°N 在地理空间上基本对应荒漠草原生态系统类型,质量变化趋势较平缓;位于 107°—117°N 的平原地区,由于气候变化和人类活动的影响,生态系统质量变化剧烈,主要呈降低趋势;118°N 以东地区,生态系统质量主要呈增加趋势。

### 3.2 生态系统质量变化与气候和人类活动之间的关系

由于气候的作用和人类活动的影响,内蒙古生态系统质量发生着巨大的变化。本文首先对生态系统质量变化与所有可能的影响因子做相关性分析,发现与降水、温度、农业、道路密度、生态工程因子相关性明显

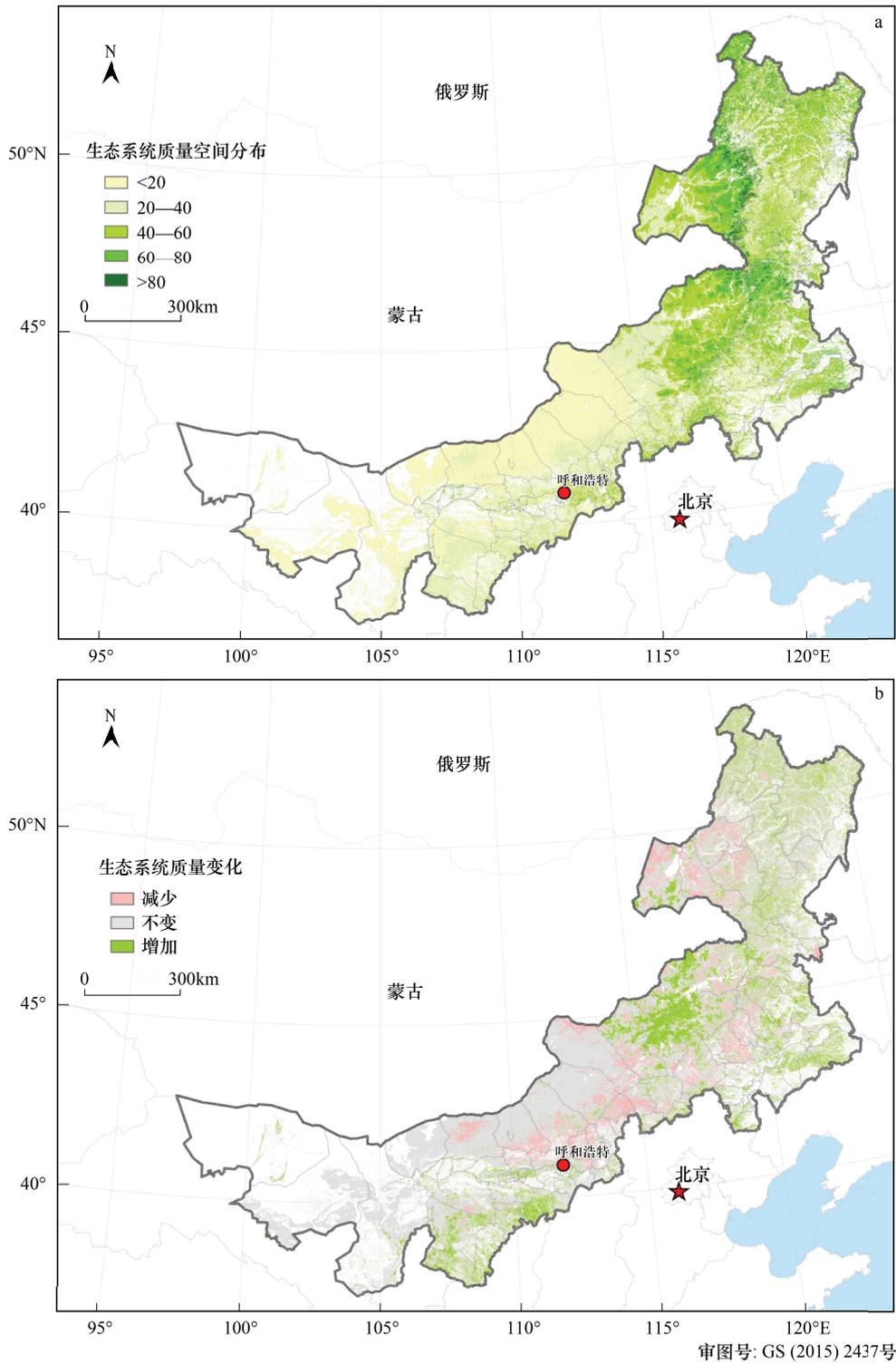


图2 内蒙古2010年生态系统质量空间分布和内蒙古2000—2010年生态系统质量变化

Fig.2 Spatial pattern of ecosystem quality in Inner Mongolia in 2010 and variation of ecosystem quality area in Inner Mongolia from 2000—2010

(表2)。生态系统质量与降水、GDP1、化肥施用量、天保工程和退耕还草工程呈现明显的正相关( $r=0.543, P<0.01; r=0.308, P<0.01; r=0.417, P<0.01; r=0.292, P<0.01; r=0.395, P<0.01$ )。然而,与温度、道路密度和京津风沙治理工程呈现明显的负相关( $r=-0.381, P<0.01; r=-0.299, P<0.01; r=-0.346, P<0.01$ )。其

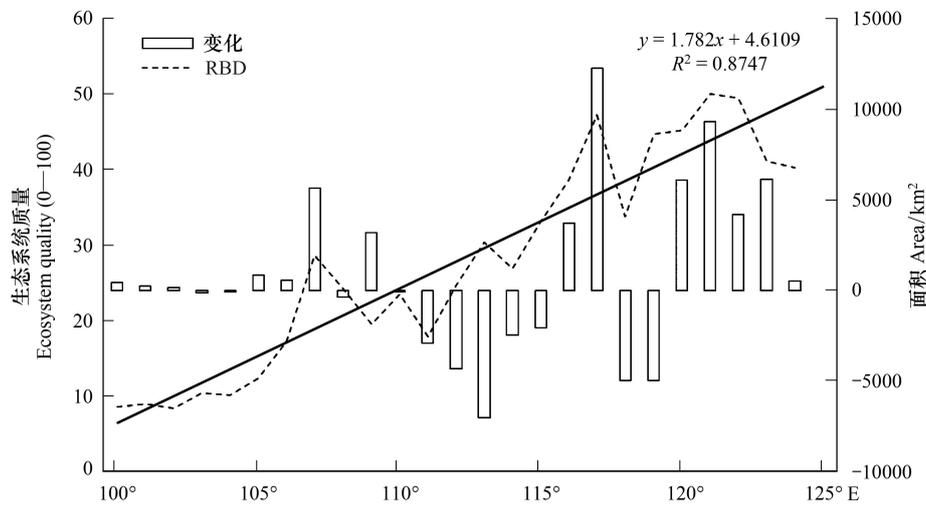


图 3 内蒙古 2000—2010 年生态系统质量经向变化规律

Fig.3 Spatial pattern of ecosystem quality and its variation with longitude in Inner Mongolia from 2000—2010

表 2 生态系统质量变化与气候和人类活动之间的相关系

Table 2 The relationship between ecosystem quality change and drivers (climate and human factors)

区域 Regions	降水 Precipitation	温度 Temperature	GDP1 Gross domestic product	道路密度 Road density	化肥总量 Amount of chemical fertilizer	天保工程 Natural forest protection project	退耕还草工程 Green for Grain Project	京津风沙工程 Wind and sand storm control project	样本 Samples
总区域 Whole region	0.543 **	-0.381 **	0.308 **	-0.299 **	0.417 **	0.292 **	0.395 **	-0.346 **	89
天保工程 Natural forest protection project									
0 (未实施) Not implement	0.714 **	-0.567 **	0.411 **	-0.446 **	0.542 **				52
1 (实施) Implement	0.267	-0.201	-0.009	0.316	0.121				37
退耕还草工程 Green for Grain Project									
0 (未实施) Not implement	0.554 **	-0.460 **	0.287 *	-0.331 *	0.321 *				49
1 (实施) Implement	0.388 *	-0.284	0.289	0.019	0.431 **				40
京津风沙工程 Wind and sand storm control project									
0 (未实施) Not implement	0.428 **	-0.344 **	0.297 *	-0.107	0.435 **				60
1 (实施) Implement	0.725 **	-0.534 **	0.246	-0.303	0.285				29

\*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; \* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

中,生态保护工程实施区域内和区域外的相关性存在显著的差异性。例如,在实施天然林保护和退耕还草工程区域内,生态系统质量变化与降水、温度、GDP1、道路密度等因子的相关性不显著;但在区域外(未实施),它们之间的相关性非常显著。说明在工程区域内,生态系统质量的变化主要与植树造林、退耕还草、围封转移和有效管理等密切相关,而受降水、温度等其他因素的影响较小;而工程区域外,生态系统质量的变化主要受降水、温度等因素的影响。然而,京津风沙工程区的状态刚好与之相反,区域内主要受到降水、温度的影响,说

明该区域人类活动的影响较小,气候仍然是主导因素。

图4(以县域为统计单位的散点图)清楚的说明了这些相关信息。近10年来内蒙古生态系统质量的变化与降水的相关性最大( $r=0.543$ ,  $P<0.01$ ),反映了降水是该地区生态系统质量变化的主要影响因子。由于内蒙古主要的生态系统类型为草地,同时草原区热量条件相对充足,能够满足植被生长的需要,降雨量成为控制植被的生长状况主要气候因子。张戈丽等<sup>[27]</sup>研究表明降水是驱动呼伦贝尔草地植被年际变化的主要因素。虽然生态系统质量变化与温度的相关关系不如降水那样明显,但总体而言相关较为显著。温度的增加对植被生长有着正负效应:正效应是延长植被生长季节,提高光合作用效率和水利用率,从而促进植被的生长;而负效应主要在于增加水分消耗从而引发干旱,不利于植被生长<sup>[28]</sup>。内蒙古地区属于干旱、半干旱地区,温度增加使该地区缺少水分,从而不利于植被生长。除了气候变化的影响,人类活动对生态系统存在一定的干扰。在人口稀少的内蒙古地区,植被生长状况主要受自然因素的影响较大,而受人类活动的影响较小。但是随着社会经济的快速发展,人口的增长对资源的需求量的加大,促进交通运输的发展,严重制约着该地区生态系统

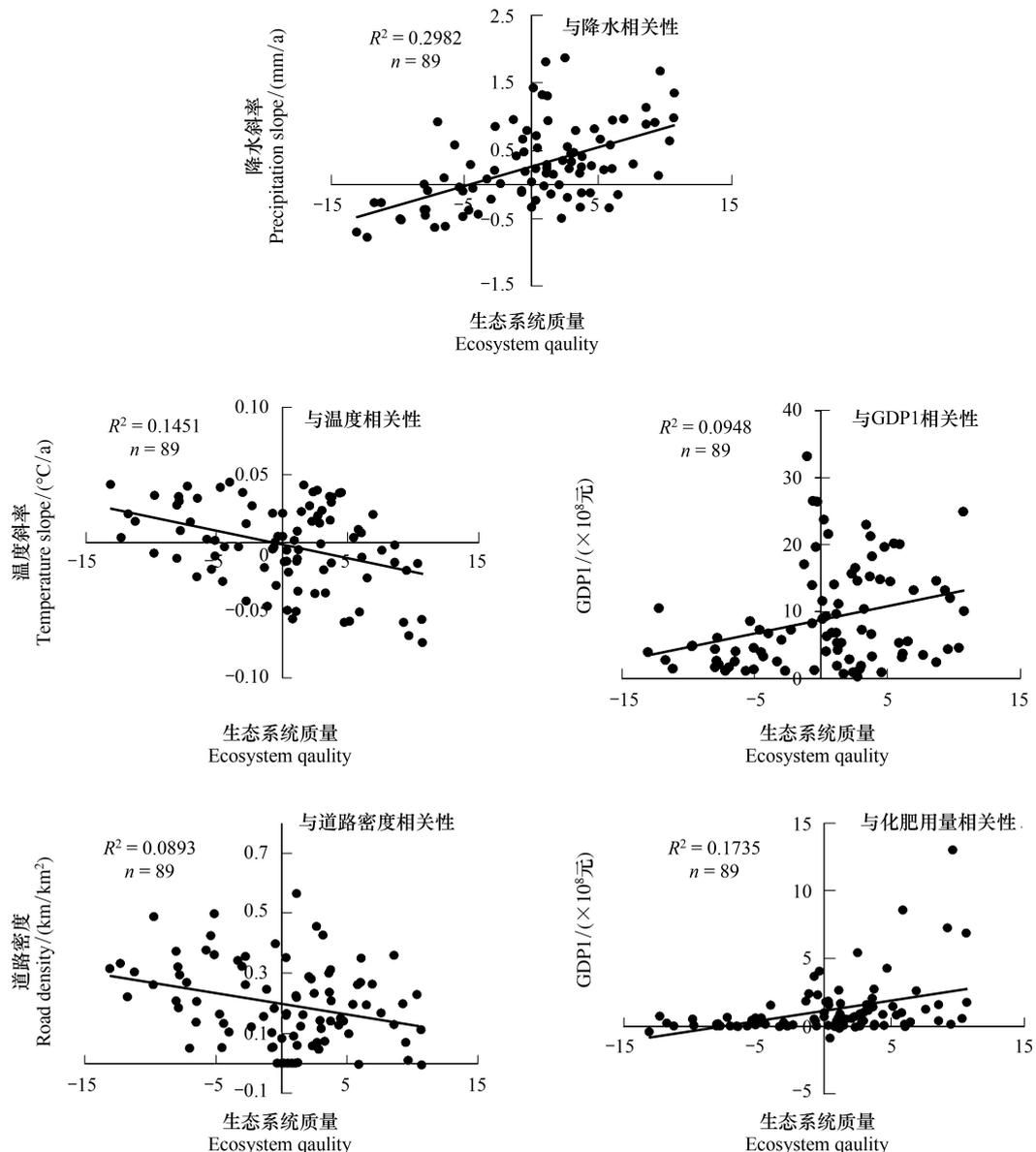


图4 内蒙古2000—2010年生态系统质量变化与影响因子的相关性(降水、温度、GDP1、道路密度、化肥用量)

Fig.4 Relation between ecosystem quality and driving factors (precipitation, temperature, gross domestic product (agricultural product), amount of fertilizer use, road density) from 2000 to 2010 in Inner Mongolia (Each dot represents a county; The line represents the fitted curve)

质量的恢复与改善。与此同时,近年来国家实施了天然林保护、退耕还草、京津风沙源治理、禁牧轮牧和围封转移等一系列生态恢复工程,在一定程度上又减少了人类活动的负面影响。此外,农业的发展、合理的管理和利用草地资源,在一定程度上利于草地质量的改善。因此,该区域的生态系统质量的恢复与改善,需要重点考虑水分、温度、农业发展和生态工程的影响。

为了进一步了解内蒙古近 10 年来生态系统质量的变化状态,将生态系统质量变化区域分为主要增加和降低两个典型区域。增加典型区域位于毛乌素沙地西部、锡林郭勒高原西北部和科尔沁沙地东部地区(图 5);相对于增长地区,降低典型区域分布相对较为集中,主要沿鄂尔多斯高原-浑善达克沙地南缘-锡林郭勒高原东南部一线呈条带状分布(图 5)。统计分析增加和降低区域内各影响因子状况(表 3),发现增加区域内生态系统质量改善非常明显,为 5.22 远高于总区域均值 0.16。其中降水量的增加非常明显,远高于总区域均值 0.28 mm/a。同时,退耕还草工程主要在该地区实施(占 69.57%的面积),并且效果明显。这里的温度也呈一定的降低趋势,每年降低 0.02 °C。此外,道路密度的增长速度较慢,低于平均水平。农业的发展和化肥施用量的增加,在一定程度上利于该区域植被的恢复。由于内蒙古生态系统质量的变化与降水、农业、退耕还草成正相关性,而与温度和道路成负相关性。所以该区域生态系统质量的改善主要是由于区域内降水的增加、温度的降低、农业的发展、退耕还草工程的作用和交通发展的放缓。与此同时,降低典型区域内生态系统质量退化非常严重,为-7.43,远低于总区域的均值。其中降水量的减少非常明显,大约为-0.37 mm/a。这里的温度也呈现一定的上升趋势,每年增加 0.02 °C。此外,道路密度的增长速度较快,农业发展比较缓慢。结果表明该区域生态系统质量的下降主要是因为降水的减少、温度的增加、农业发展缓慢和交通发展的加快所致。虽然京津风沙工程主要分布在该地区(占 68.42%的面积),但是治理效果并不明显,可能是由于降水与温度的变化导致的植被退化程度要大于生态恢复工程的治理效果。

表 3 内蒙古生态质量主要变化区域内各影响因子状况

Table 3 The impact factor in main change area in Inner Mongolia

区域 Regions	生态系统质量 Ecosystem quality	降水/(mm/a) Precipitation	温度/(°/a) Temperature	GDP1 Gross domestic product/ (×10 <sup>8</sup> 元)	道路密度 Road density/ (km/km <sup>2</sup> )	化肥总量 Amount of chemical fertilizer/ (×10 <sup>4</sup> t)	天保工程 Natural forest protection project/%	退耕还草 工程 Green for Grain Project/%	京津风沙 工程 Wind and sand storm control project/%
增加区域 Improvement Areas	5.22(+)	0.47(+)	-0.02(-)	10.04(+)	0.18(-)	2.52(+)	30.43(-)	69.57(+)	26.09(-)
降低区域 Degradation areas	-7.43(-)	-0.37(-)	0.02(+)	4.92(-)	0.28(+)	0.29(-)	21.05(-)	15.79(-)	68.42(+)
总区域 Whole region	0.16	0.28	0.00	8.85	0.20	1.18	41.13	44.82	32.51

(+) 相对于总区域平均值而言,呈增加趋势; (-) 相对于总区域平均值而言,呈减少趋势

近些年来,国家越来越重视生态环境的保护,在全国范围内实施了一系列的生态恢复工程,而内蒙古又是这些工程的重点实施区域之一。在工程实施区域,人类活动强度的加大对植被状况的时空演变产生了重要影响,同时导致研究区植被对气候因子的变化敏感性降低,这与黄土高原植被变化监测结论类似<sup>[29]</sup>。大规模的植被建设促进了区域植被恢复,区域内生态系统质量显著增加,同时对气候等自然因子的变化敏感度降低。本研究发现 2000—2010 年间内蒙古一些主要的沙尘源地(毛乌素沙地西部和科尔沁沙地东部)的植被状况呈持续好转趋势,植树种草、禁牧轮牧和防沙治沙生态恢复措施的广泛实施在这一过程中发挥重要作用,与许多研究结果一致<sup>[30-31]</sup>;此外,内蒙古中部地区受降水、温度等气候影响仍很敏感,降水的减少、温度的升高和交通的发展,使草原区中部的大部分区域 10 年间植被质量呈现下降趋势。

#### 4 结论

本文基于 2000—2010 年生物量和植被覆盖度,并结合植被区划数据,对内蒙古生态系统质量状况进行分

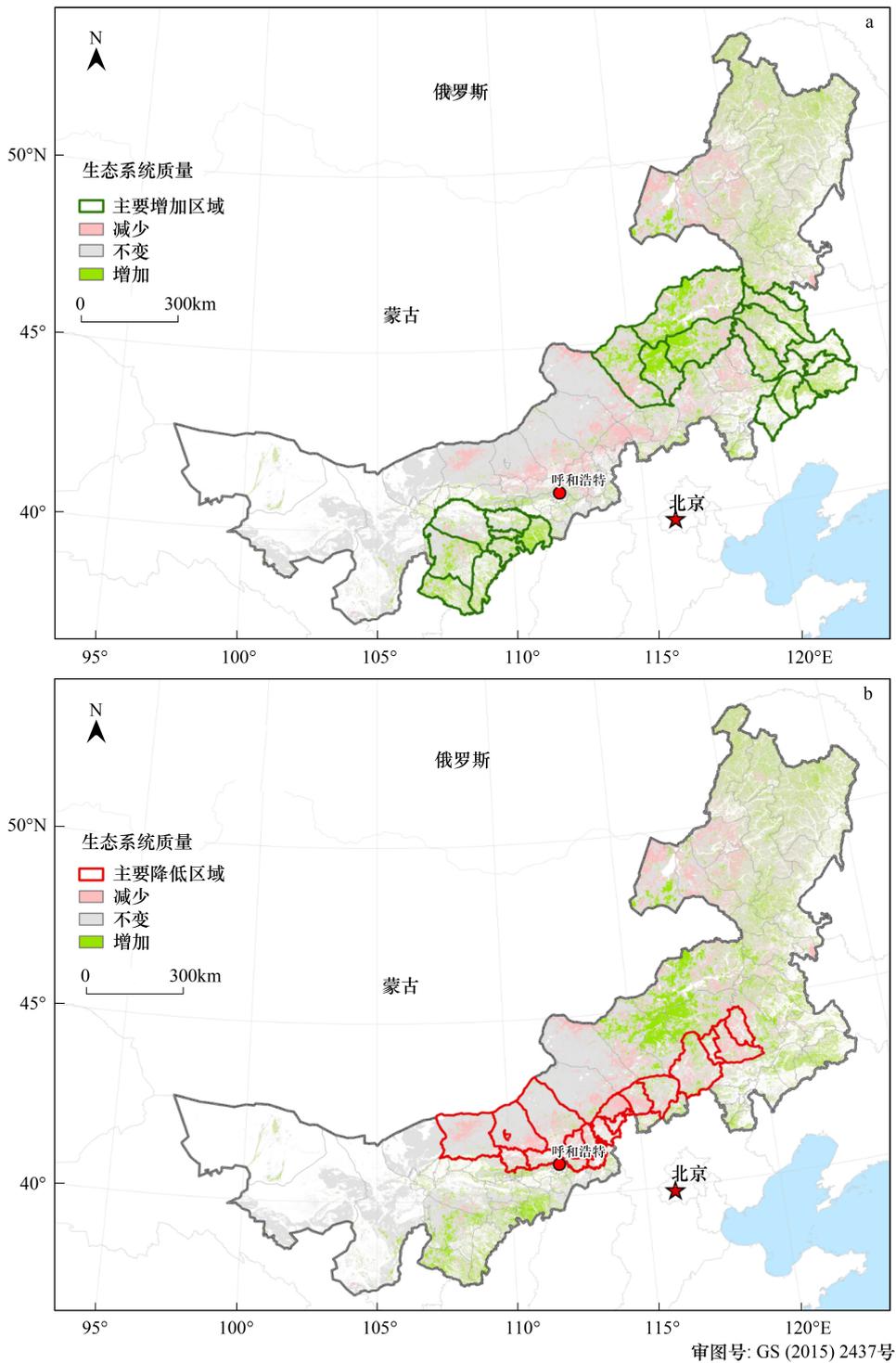


图 5 内蒙古生态系统质量主要增加区域和内蒙古生态系统质量主要降低区域

Fig.5 The mainly increase region of ecosystem quality in Inner Mongolia and the mainly decrease region of ecosystem quality in Inner Mongolia

析,并评估其与气候(降水、温度),人类活动(农业、交通、生态恢复工程等)的相关关系,在此基础上探讨了气候和人类活动对内蒙古生态系统质量的影响。得出以下结论:

(1) 内蒙古生态系统质量状况整体偏低,2010 年平均生态系统质量为 33.80,其中森林生态系统平均质量最高,灌丛、草原生态系统次之。空间分布呈明显的经度地带性,由东向西,质量逐渐降低。2000—2010 年

内蒙古生态系统质量总体上呈现缓慢增长趋势,但局部地区生态系统质量仍存在恶化,其中质量增加的面积约为 120900.43 km<sup>2</sup>。在位于 100°—106°E 的荒漠地区,生态系统质量变化趋势较平缓;在位于 107°—117°E 的草原地区由于气候变化和人类活动的影响,生态系统质量变化剧烈,主要呈降低趋势;118°E 以东地区,植被生态系统质量主要呈增加趋势。

(2) 近 10 年来内蒙古生态系统质量的变化与气候和人类活动的关系非常密切,其与降水、GDP1、化肥施用量、天保工程和退耕还草工程呈现明显的正相关。而与温度、道路密度和京津风沙治理工程呈现明显的负相关。其中,生态保护工程实施区域内和区域外的相关性存在显著的差异性。说明在工程区域内,生态系统质量的变化主要与植树造林、退耕还草、围封转移和有效管理等人类活动密切相关,而受降水、温度等其他因素的影响较小;而工程区域外,生态系统质量的变化主要受降水、温度等因素的影响。但是,京津风沙工程区的状态刚好与之相反,主要受到降水、温度的影响,而人类活动的影响相对较小。随着内蒙古社会经济的快速发展,人类活动对生态系统质量的影响逐渐加强,但降水仍是该地区生态系统质量的主要影响因子。

(3) 内蒙古生态系统质量增加典型区域主要位于毛乌素沙地西部、锡林郭勒高原西北部和科尔沁沙地东部地区;降低典型区域主要沿鄂尔多斯高原-浑善达克沙地南缘-锡林郭勒高原东南部一线呈条带状分布。典型区内质量的增长主要是由于降水的增加、温度的降低、农业的发展、退耕还草工程的作用和交通发展的放缓。质量的降低则是因为降水的减少、温度的增加、农业发展缓慢和交通发展的加快所致。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 赵敏,周广胜. 基于森林资源清查资料的生物量估算模式及其发展趋势. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1468-1472.
- [ 2 ] Brown S, Sathaye J, Cannell M, Kauppi P E. Mitigation of carbon emissions to the atmosphere by forest management. Commonwealth Forestry Review, 1996, 75(1): 80-90, 109-109, 111-112.
- [ 3 ] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [ 4 ] 方精云,陈安平,赵淑清,慈龙骏. 中国森林生物量的估算:对 Fang 等 Science 一文(Science, 2001, 291: 2320—2322)的若干说明. 植物生态学报, 2002, 26(2): 243-249.
- [ 5 ] 方精云,刘国华,徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
- [ 6 ] 刘国华,傅伯杰,方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740.
- [ 7 ] 王效科,冯宗炜,欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究. 应用生态学报, 2001, 12(1): 13-16.
- [ 8 ] 刘晓梅,布仁仓,邓华卫,胡远满,刘志华,吴志伟. 基于地统计学丰林自然保护区森林生物量估测及空间格局分析. 生态学报, 2011, 31(16): 4843-4890.
- [ 9 ] Adams J E, Arkin G F. A light interception method for measuring row crop ground cover. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41(4): 789-792.
- [ 10 ] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, Rundquist D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(1): 76-87.
- [ 11 ] Purevdorj T S, Tateishi R, Ishiyama T, Honda Y. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(18): 3519-3535.
- [ 12 ] Wang G, Wentz S, Gertner G Z, Anderson A. Improvement in mapping vegetation cover factor for the universal soil loss equation by geostatistical methods with Landsat Thematic Mapper images. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(18): 3649-3667.
- [ 13 ] Moreau S, Bosseno R, Gu X F, Baret F. Assessing the biomass dynamics of Andean *bofedal* and *titora* high-protein wetland grasses from NOAA/AVHRR. Remote Sensing of Environment, 2003, 85(4): 516-529.
- [ 14 ] 吴云,曾源,赵炎,吴炳方,武文波. 基于 MODIS 数据的海河流域植被覆盖度估算及动态变化分析. 资源科学, 2010, 32(7): 1417-1424.
- [ 15 ] 徐涵秋,何慧,黄绍霖. 福建省长汀县河田水土流失区植被覆盖度变化及其热环境效应. 生态学报, 2013, 33(10): 2954-2963.
- [ 16 ] 孙根年,王美红. 内蒙古植被覆盖与土地退化关系及空间结构研究. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 140-144.
- [ 17 ] 孙艳玲,郭鹏,延晓冬,赵天宝. 内蒙古植被覆盖变化及其与气候、人类活动的关系. 自然资源学报, 2010, 25(3): 407-414.
- [ 18 ] 时忠杰,高吉喜,徐丽宏,冯朝阳,吕世海,尚建勋. 内蒙古地区近 25 年植被对气温和降水变化的影响. 生态环境学报, 2011, 20(11): 1594-1601.
- [ 19 ] Guo Q, Hu Z M, Li S G, Li X R, Sun X M, Yu G R. Spatial variations in aboveground net primary productivity along a climate gradient in

- Eurasian temperate grassland; effects of mean annual precipitation and its seasonal distribution. *Global Change Biology*, 2012, 18 (12): 3624-3631.
- [20] 娄雪婷, 曾源, 吴炳方, 苏常红, 徐延达, 赵炎. 延河流域阔叶林地上生物量遥感监测及空间分布特征分析. *资源科学*, 2010, 32(11): 2229-2238.
- [21] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 603-608.
- [22] Leprieur C, Verstraete M M, Pinty B. Evaluation of the performance of various vegetation indices to retrieve vegetation cover from AVHRR data. *Remote Sensing Review*, 1994, 10(4): 265-284.
- [23] Jiapaer G, Chen X, Bao A M. A comparison of methods for estimating fractional vegetation cover in arid regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1698-1710.
- [24] Qi J, Marsett R C, Moran M S, Goodrich D C, Heilman P, Kerr Y H, Dedieu G, Chehbouni A, Zhang X X. Spatial and temporal dynamics of vegetation in the San Pedro River basin area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 105(1/3): 55-68.
- [25] 于小飞, 孙睿, 陈永俊, 刘绍民, 周会珍, 张忠山. 乌审旗植被覆盖度动态变化及其与降水量的关系. *资源科学*, 2006, 28(4): 31-37.
- [26] Loyarte M M G, Menenti M. Impact of rainfall anomalies on Fourier parameters of NDVI time series of northwestern Argentina. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(4): 1125-1152.
- [27] 张戈丽, 徐兴良, 周才平, 张宏斌, 欧阳华. 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.
- [28] Mooney H A, Canadell J, Chapin III F S, Ehleringer J R, Körner C, McMurtrie R E, Parton W J, Pitelka L F, Schulze E D. Ecosystem physiology responses to global change // Walker B, Steffem W, Canadell J, eds. *The Terrestrial Biosphere and Global Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 190-228.
- [29] 张宝庆, 吴普特, 赵西宁. 近 30a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 287-293.
- [30] 王娟, 李宝林, 余万里. 近 30 年内蒙古自治区植被变化趋势及影响因素分析. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(2): 132-138.
- [31] 殷贺, 李正国, 王仰麟, 蔡福. 基于时间序列植被特征的内蒙古荒漠化评价. *地理学报*, 2011, 66(5): 653-661.