DOI: 10.5846/stxb201408281708

黄麟,曹巍,巩国丽,赵国松.2000—2010 年中国三北地区生态系统时空变化特征.生态学报,2016,36(1): -

Huang L, Cao W, Gong G L, Zhao G S.Spatial and temporal variations in ecosystems in the three northern regions of China, 2000—2010. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): - .

2000—2010 年中国三北地区生态系统时空变化特征

黄 麟*,曹 巍,巩国丽,赵国松

中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101

摘要:本文基于遥感解译与反演、模型模拟估算等方法,以地面调查作为主要验证手段,分析了 21 世纪前 10 年我国三北地区生态系统宏观结构、质量及关键服务变化状况及其驱动因素。结果表明:(1)2000—2010 年,三北地区林地面积净增加了 0.69 万 km²,草地面积减少了 0.13 万 km²,湿地面积净减少 0.21 万 km²,耕地面积减少了 0.87 万 km²,人工表面增加了 0.57 万 km²,其它类型面积持续减少了 496.5km²。(2)近 10 年,三北地区归一化植被指数(NDVI)、叶面积指数(LAI)、地上植被生产力总体呈现轻微增加趋势,特别是黄土高原丘陵沟壑区,然而植被覆盖度总体呈现微弱减少趋势。(3)近 10 年,三北地区单位面积土壤风蚀模数下降了 27.25%,减少速率为每年 1.13 吨/公顷,由于风蚀力逐年减弱导致防风固沙服务量呈现减弱趋势。三北地区水蚀区近 10 年土壤水蚀模数总体呈现微弱增加趋势,而黄土高原区和风沙区则呈现降低趋势,生态系统单位面积土壤保持服务量呈现增加趋势,年增速 0.28 吨/公顷,说明土壤保持能力有所提高。(4)三北地区近 10 年气温变化斜率为 0.02℃/年,年适度增温、降水量增加有利于植被恢复;东北华北平原农区和黄土高原亚区人类负向扰动指数呈现减少趋势,说明人类活动对这两个区域自然生态系统的扰动有所遏制。

关键词:三北地区;生态系统;时空格局;十年变化;遥感

Spatial and temporal variations in ecosystems in the three northern regions of China, 2000-2010

HUANG Lin*, CAO Wei, GONG Guoli, ZHAO Guosong

Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Beijing 100101, China

Abstract: This study analyzed the ecosystem macrostructure, quality, and key services and their driving forces in the three northern regions (northeastern, northwestern, and northern) of China, in the first 10 years of the 21st Century. The results showed that (1) during 2000—2010, forestland area increased by 10,300 km²; grassland decreased by 900 km²; wetland area decreased by 33.9 km²; farmland increased by 1,900 km²; artificial coverage increased by 12,400 km²; and other ecosystems decreased by 23,700 km² in the three northern regions. (2) The normalized difference vegetation index (NDVI), leaf area index (LAI), and aboveground vegetation productivity in these regions increased slightly over the past 10 years, especially in the Loess Hilly Region. However, the vegetation coverage decreased slightly. (3) The soil erosion modulus per unit area decreased by 27.25% in the three northern regions, with an annual reducing rate of 1.13 t/ha. The amount of sand-fixing services was low because the force of wind erosion decreased annually, suggesting that a reduced force in wind erosion decreases the amount of soil erosion. In soil water erosion zones of the three northern regions, the soil water erosion modulus showed a slight increasing trend in the past 10 years, whereas the modulus in the Loess Plateau and sand areas showed decreasing trends. The amount of ecosystem soil conservation service per unit area showed an increasing

基金项目:"十二五"科技支撑计划课题(2013BAC03B04),全国生态环境十年(2000—2010年)变化遥感调查与评估项目专题(STSN-14-00)

收稿日期:2014-08-28; 修订日期:2015-06-01

^{*}通讯作者 Corresponding author.E-mail: huanglin@igsnrr.ac.cn

trend, with an annual increasing rate of 0.28 t/ha, indicating improved soil conservation capacity. (4) The temperature increased by 0.02°C/year, and precipitation increased by 3.00 mm/y in the past 10 years in the three northern regions, and the moderate warming and increased precipitation were useful for vegetation recovery. The human disturbance index showed decreasing trends in Loess Plateau and in the agricultural areas of Northeast and North Plain, indicating that the effect of human disturbances on natural ecosystems has been suppressed in these two regions.

Key Words: the three northern regions; ecosystem; spatial and temporal patterns; variations in the last 10 years; remote sensing

三北地区是我国最重要的自然资源储备区和生态屏障区,也是我国荒漠化最严重的地区^[1],荒漠化土地面积占全国荒漠化土地面积的 55%以上^[2]。地表径流和地下水资源不足,地面植被覆盖度不高、生产量偏低,生态环境极其脆弱^[3],风沙危害和水土流失十分严重^[4-5]。为了从根本上改善三北地区的生态环境状况,我国于 1978 年启动了三北防护林体系建设工程,至 2010 年完成了三北防护林四期工程。2000 年以来,我国在三北地区还实施了退耕还林(还草)、退牧还草、天然林保护等重大生态建设工程等。

许多学者开展了三北地区生态环境状况相关的研究,集中在三北地区防护林体系区域分异与开发潜力^[3]、区域气候变化及防护林的气候生态适应性^[5-7],区域蒸散发变化^[8],乔、灌木树种最适分布范围^[9],防护林空间分布信息提取及遥感监测^[10-11],多年 NDVI 与植被覆盖度时空变化^[12-14],土地退化及趋势^[15],水土流失和土壤侵蚀估算^[16-17]等。此外,探究三北地区生态问题亦成为众多学者的一个主要研究方向。违背植被地带性分布规律,重乔轻灌草、土壤水分亏缺、土壤肥力不足和不平衡等^[18-20]。上述研究主要针对三北地区生态环境单因素开展分析,缺少对该地区生态系统整体状况的全面、科学、准确地把握。

我们迫切需要了解,三北地区过去 10 年开展了大量重大生态建设工程后,区域生态系统如何变化? 发生变化的主要驱动因素是什么? 哪些因素产生正面作用,哪些产生负面作用? 因此,本文试图通过分析 2000—2010 年生态系统类型、质量以及防风固沙、土壤保持生态系统服务的时空格局变化,了解气候变化与生态工程背景下三北地区近 10 年生态系统变化状况,并分析气候因子与人类扰动对三北地区生态系统变化的驱动作用,为科学地评估生态工程的生态效应以及后续生态工程的滚动实施提供理论依据。

1 研究方法与数据

1.1 研究区概况

中国三北地区系指昆仑-秦岭-大巴山以北的部分地区,横跨我国西北、华北和东北三大地域^[2],辖 13 省(市),面积约占国土面积的 42.4%。该区气候差异显著,大部分属于干旱、半干旱气候带,降水量由东向西、从南到北递减,年均降水量在 20—450mm^[4]。受降水量的影响,天然植被类型从东到西依次为森林、森林草原、草原和荒漠。

1.2 生态系统类型及其时空变化分析

三北地区生态系统类型主要划分为林地、草地、湿地、耕地、人工表面、其它等6个类型。林地即木本为主的植物群落,郁闭度不低于0.2,高度在0.3米以上,包括自然、半自然植被及集约化经营和管理的人工木本植被。草地是一年或多年生草本植被为主的植物群落,覆盖度大于20%,高度在3米以下。湿地包括沼泽、水域、永久性冰川、滩地等。耕地是以收获为目的、有耕犁活动的人工种植草本植物覆盖表面。人工表面即人工建造用于城乡居民点、工矿、交通等的陆地表面。其它包括年内最大植被覆盖度小于20%的地表及冰雪。基于2000、2005、2010年 TM/ETM+、环境小卫星等30m 空间分辨率遥感影像数据,经图像精纠正和拉伸处理后,通过遥感解译判读,生成几期生态系统类型空间分布数据。通过1°×1°经纬度交叉点的野外调查信息进行结果的校正与验证,类型精度达到85%以上。进而对生态系统类型空间数据进行统计分析,综合评价6大

生态系统类型的时空变化态势。

1.3 生态系统质量及其变化分析

收集 2000 年至 2010 年 MODIS 的 16 天 250m 分辨率 NDVI 数据(MOD13Q1),数据进行格式转换、重投影、图像的空间拼接、重采样和滤波处理,采用最大合成法(MVC)得到年 NDVI 数据。利用 NDVI 数据计算植被覆盖度,根据像元二分模型理论,可以认为一个像元的 NDVI 值是由绿色植被部分贡献的信息与无植被覆盖部分贡献的信息组合而成,最大植被覆盖度根据以下公式计算:

$$FC = \frac{\text{NDVI-NDVIsoil}}{\text{NDVIveg-NDVIsoil}} \tag{1}$$

其中,Fc 是植被覆盖度,NDVIveg 是纯植被像元的 NDVI 值;NDVIsoil 是完全无植被覆盖像元的 NDVI 值,纯植被像元和完全无植被像元根据生态系统类型数据进行识别。

采用 CASA 模型^[21]计算植被净初级生产力,输入参数包括气象数据插值的 1km 平均温度、蒸散量、日照时数,MODIS1km 分辨率反照率与植被指数产品,数字化的 1:100 万植被类型分布等,计算过程如下:

$$NPP = APAR(t) \times \varepsilon(t)$$
 (2)

$$APAR = fPAR \times PAR \tag{3}$$

从资料文档、气象数据中得到太阳总辐射量、及日照时数等信息,然后结合像元经纬度计算得到 PAR。 利用 NDVI 计算比值指数 SR,通过 fPAR 与 SR 之间存在关系得到 fPAR。

$$FPAR = \frac{(SR - SRmin) \times (FPARmax - FPARmin)}{SRmax - SRmin} + FPARmin$$
 (4)

$$SR = \frac{\text{NIR}}{\text{RED}} = \frac{1 + \text{NDVI}}{1 - \text{NDVI}} \tag{5}$$

其中,FPARmin 和 FPARmax 的取值与植被类型无关,分别取值为 0.001 和 0.95,SRmin 和 SRmax 与植被类型有关,为对应植被类型 NDVI 的 5%和 95%的下侧百分位数。NIR 和 RED 分别表示近红外波段和红波段的反射率。

植被将吸收的光合有效辐射(APAR)通过光合作用转化为有机碳的效率计算如下:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon^* \times T_1(t) \times T_2(t) \times W(t) \tag{6}$$

其中,ε*是最大光利用率(单位:gMJ⁻¹)。T1 和 T2 表示环境温度对光利用的抑制影响,W 为水分影响胁迫系数,均为无量纲参数。

叶面积指数(LAI)是利用遥感反射率数据,结合生态系统分类数据得到调查区域内不同植被类型的像元的 NDVI,然后采用查找表的方法,反演区域尺度上植被冠层 LAI。

1.4 生态系统服务及其变化分析

1.4.1 防风固沙服务量变化分析

在充分考虑气候条件、植被状况、地表土壤的粗糙度、土壤可蚀性、土壤结皮的情况下,利用修正的土壤风蚀方程(RWEQ)定量评估土壤风蚀量。

$$Q_x = Q_{\text{max}} \left[1 - e^{\left(\frac{x}{s}\right)^2} \right] \tag{7}$$

$$Q_{\text{max}} = 109.8 \times (WF \times EF \times SCF \times K' \times COG) \tag{8}$$

式中,SL 表示土壤风蚀模数,x 表示地块长度, Q_x 表示地块长度 x 处的沙通量(kg/m); Q_{max} 表示风力的最大输沙能力(kg/m);s 表示关键地块长度(m);WF 表示气象因子;EF 表示土壤可蚀性成分;EF 表示土壤结皮因子;EF 表示土壤糙度因子;EF 表示土壤糙度因子;EF 表示土壤糙度因子,包括平铺、直立作物残留物和植被冠层。气候因子中的风和土壤湿度根据中国气象科学数据共享服务网(EF),EF0 位。EF0 cma.gov.cn)下载的日均风速、降水、温度、日照时数等计算;雪盖因子利用从中国西部环境与生态科学数据中心(EF1 cman) 下载的中国雪深长时间序列数据集来计算。土壤可蚀性因子根据 EF1 cman) 下程计算。土壤数据来源于西部环境与生态科学数

据中心 1:100 万土壤类型图所附的土壤属性表和空间数据。根据文献收集地面测定的我国不同地区的风蚀模数结果[23-26]对本估算结果进行验证。

通过对生态系统防风固沙服务量进行定量分析来衡量生态系统防风固沙的能力。防风固沙服务量为裸 土条件和地表覆盖植被条件下的土壤风蚀量的差值:

$$SL_{SV} = SL_S - SL_V \tag{9}$$

式中,SLsv表示防风固沙服务量,SLs表示裸土条件下的潜在土壤风蚀量,SLv表示植被覆盖条件下的现实土壤风蚀量。

1.4.2 土壤保持服务量变化分析

基于修正的通用水土流失方程(RUSLE)计算单位面积土壤流失量,即土壤侵蚀模数。RUSLE 包含降雨侵蚀力因子(R)、土壤可蚀性因子(K)、坡长因子(L)、坡度因子(S)、覆盖和管理因子(C)等。

$$A = R \times K \times L \times S \times C \tag{10}$$

基于国家气象台站的日降雨量数据以及日平均气温等气象资料,采用日降雨量拟合模型^[27]来估算降雨侵蚀力。利用 1:100 万土壤数据库,根据 Nomo 图法估算土壤可蚀性因子值。基于 SRTM3 V4.1 数据加工制作得到的全国 90 米分辨率 DEM 数据,根据 McCool 等^[28]和 Liu 等^[29]的核心算法计算坡度坡长因子。盖度和管理因子采用蔡崇法^[30]提出的利用植被覆盖度计算 C 值的方法。通过查找文献搜集到多个地区的土壤侵蚀模数资料,将估算得到的土壤侵蚀模数与其进行对比验证。

通过对生态系统土壤保持量进行定量分析来衡量生态系统保育土壤的能力。土壤保持量为生态系统在极度退化状况下的土壤流失量与现实状况下土壤流失量的差值。

$$A_C = A_D - A_R \tag{11}$$

$$A_D = R \times K \times L \times S \times C_D \times P \tag{12}$$

$$A_R = R \times K \times L \times S \times C_R \times P \tag{13}$$

 $A_C = R \times K \times L \times S \times (C_D - C_R) \times P$ (14)

 A_{c} 为土壤保持量, A_{D} 和 A_{R} 分别表示生态系统在极度退化状况下的土壤流失量与现实状况下土壤流失量,可以发现 A_{D} 和 A_{R} 的差异仅仅体现在 C 因子。

1.5 驱动力因子分析

采用最小二剩法分析气温、降水等气象要素的年际变化趋势:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i X_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} m_i \sum_{i=1}^{n} X_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^{n} m_i\right)^2}$$
(15)

式中,S 为变化斜率,Xi 为气温、降水量观测值, $i=1, 2, 3, \dots n, m_i$ 为年份序数, $m_1=1, m_2=2, m_3=3, \dots, m_n=n_o$

此外,根据赵国松等^[31],通过人类扰动指数评价人类活动对自然生态系统的影响程度,扰动指数值越高,人类扰动程度越高,当同一区域人类扰动程度下降时,认为人类对自然生态系统的威胁程度减小。只考虑有自然植被分布的生态系统类型的人类扰动,而对稀少植被或无植被分布生态系统类型的人类扰动不进行考虑。将生态系统分级赋值,得到4种扰动程度的分级指数,如表1所示。

表 1 人类扰动指数分级表

Table 1 The classification of disturbance index

类型 Type	自然未利用 Natural unused	自然再生利用 Natural reused	人为再生利用 Artificial reused	人为非再生利用 Artificial used
生态系统类型 Ecosystem type	盐碱地、沼泽地	林地、草地、湿地	耕地	人工表面
扰动分级指数 Classification of disturbance index	0	1	2	3

根据不同类型所占比例进行加权求和,形成一个0—3之间的值,标准化后扰动指数值域范围0—1,综合反映了某一地区的扰动程度,计算方法如下:

$$D = \frac{\left(\sum_{i=0}^{3} A_i \times P_i\right)}{3} / \sum_{i=1}^{n} P_i$$
(16)

式中,Ai 表示第 i 级生态系统扰动程度分级指数,Pi 表示第 i 级扰动程度分级面积所占百分比,D 为人类扰动指数。为便于多期综合人类扰动指数的对比,直接扣除无植被或稀疏植被分布生态系统类型占比超过 95% 的区域。

2 结果与分析

2.1 三北地区生态系统宏观结构及其变化

三北地区生态系统宏观结构分析结果表明(图 1,表 2),2010 年,三北地区以荒漠等其它类型与草地生态系统为主,其它类型面积约占全区总面积的 44%,草地占全区总面积的 22.9%。其次是耕地和林地,分别占全区的 15.8%和 13%。此外,湿地面积占 2.6%,人工表面占 1.6%。2000—2010 年,三北地区林地面积净增加了 0.69 万 km²(表 3),转入林地面积 11312.4 km²,以草地和耕地转入林地为主,林地转出面积 4438.6 km²,以转出到耕地为主。草地面积总体减少了 0.13 万 km²,其中,转入草地面积 6848.8 km²,以耕地和其它转入草地为主,草地转出面积 8132.5 km²,主要转出为耕地。湿地面积净减少 0.21 万 km²,其中转入湿地面积 2360km²,湿地转出面积 4415.7 km²,主要转出为耕地和其它。耕地面积减少了 0.87 万 km²,其中转入耕地面积 7209.2km²,以林地、草地转入耕地为主,耕地转出面积 15906.1km²,主要转出为人工表面。人工表面增加了 0.57 万 km²,其它类型面积持续减少了 496.5km²。

表 2 三北地区 2000、2005、2010 年生态系统构成特征

年份 统计指标 草地 耕地 其它 林地 湿地 人工表面 Year Statistical index Forestland Grassland Wetland Farmland Artificial coverage Others 102.2 70.25 2000 面积/(万 km2) 57.6 11.8 5.8 198.6 比例/% 22.9 2.6 15.8 1.3 44.5 12.9 2005 面积/(万 km2) 58.21 102.56 11.71 70.5 6.31 197.24 比例/% 22.9 15.8 44.0 2.6 1.6 13.1 2010 102.1 70.47 7.0 196.2 面积/(万 km²) 58.6 11.8 比例/% 23.0 2.6 15.7 1.4 44.2 13.0

Table 2 The ecosystem area of the Three Northern Region in 2000, 2005 and 2010

表 3 2000-2010 年三北地区生态系统转移矩阵/km²

Table 3 The ecosystem transformation of the Three Northern Region during 2000—2010

类型 Type	林地 Forestland	草地 Grassland	湿地 Wetland	耕地 Farmland	人工表面 Artificial coverage	其它 Others
林地 Forestland	575126.9	1501.4	193.0	2562.7	172.0	9.5
草地 Grassland	6462.5	1013740.5	180.5	940.9	398.7	149.9
湿地 Wetland	198.8	438.7	115699.4	3272.6	281.5	224.1
耕地 Farmland	4547.6	4561.5	1773.5	697559.0	4781.4	242.1
人工表面 Artificial	16.9	54.8	13.9	47.1	64184.9	4.3
其它 Others	86.6	292.4	199.1	385.9	162.4	1961617.6

2.2 三北地区生态系统质量状况及其变化

2000—2010 年,三北地区 NDVI 平均值约 0.39,总体呈现轻微弱增加趋势(图 2,表 4),年增加速率 0.008,特别是黄土高原丘陵沟壑区,年增速为 0.077,仅内蒙中东部呈现显著减少趋势。三北地区多年平均最大植被

6 生态学报 36卷

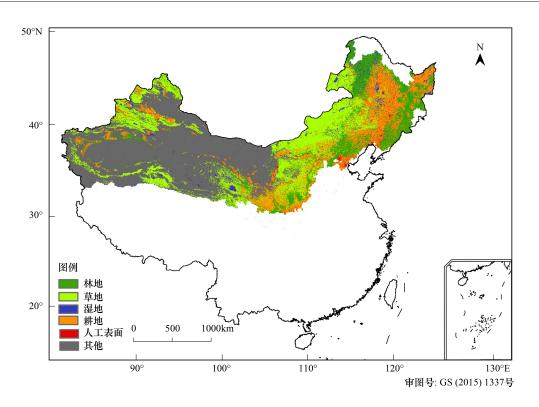


图 1 三北地区 2010 年生态系统空间分布

Fig.1 The distribution map of ecosystem in 2010

覆盖度为 37.66%,总体呈现微弱减少趋势,年减少速率约为 0.07%,其中东北华北区平均最大植被覆盖度 89.94%,近 10 年减少速率最大,约为 0.196%/年;黄土高原丘陵沟壑区平均最大植被覆盖度 61.02%,近 10 年表现为大面积覆盖度增加趋势,增加速率 0.611%/年。多年平均植被 LAI 约为 1.13,近 10 年总体呈现微弱增加趋势,增加速率 0.009/年,特别是黄土高原丘陵沟壑区和东北华北平原农区,年增加速率分别为 0.041 和 0.024。近 10 年,三北地区多年平均地上植被生产力为 236.65 gC/m².a,总体呈现增加趋势,年增速为 1.345gC/m²,其中,黄土高原区年增速高达 8.828gC/m²。

表 4 2000—2010 年三北地区生态系统质量参数均值及其变化统计

区名 Zone	NDVI		最大植被覆盖度* Maximum vegetation coverage		LAI		植被生产力** Vegetation production	
	平均 Mean	变化趋势 Trend	平均 Mean	变化趋势 Trend	平均 Mean	变化趋势 Trend	平均 Mean	变化趋势 Trend
东北华北区 Northeast and North China	0.87	0.002	89.94	-0.196	4.07	0.024	604.64	0.725
风沙区 Windy sandy area	0.54	0.009	52.63	-0.168	1.37	0.01	300.50	1.534
黄土高原区 Loess Plateau	0.62	0.077	61.02	0.611	1.57	0.041	452.24	8.828
西北荒漠区 Northwest desert area	0.20	0.002	15.81	-0.078	0.26	0.002	94.90	0.555
合计 Total	0.39	0.008	37.66	-0.07	1.13	0.009	236.65	1.345

^{*}单位:%和%/y; * *单位:gC/m2.a

2.3 三北地区生态系统关键服务及其变化

2.3.1 生态系统防风固沙服务及其变化

2000—2010年,三北地区风蚀区多年平均单位面积土壤风蚀模数为 20.69 t/hm²(表 5,图 3),其中西北荒

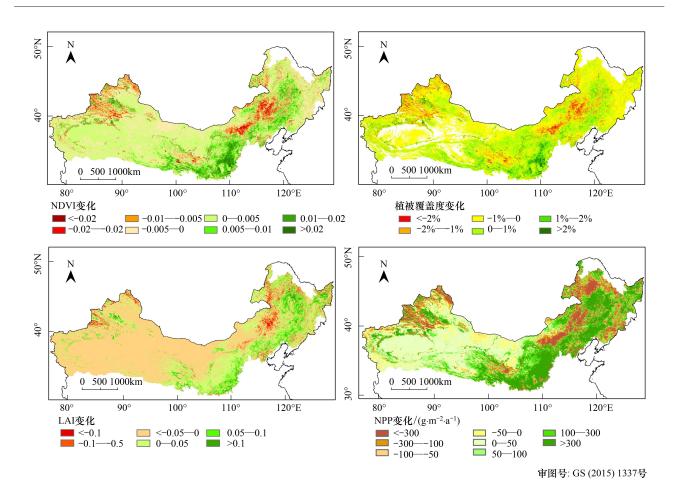


图 2 2000—2010 年三北地区 NDVI、最大植被覆盖度、LAI、地上植被生产力变化

Fig.2 The trends of NDVI, vegetation coverage, LAI and production of the study area, 2000-2010

表 5 2000—2010 年三北地区防风固沙与土壤保持服务量及其变化统计

Table 5 The ecosystem services of the Three Northern Region in 2000—2010

区名 Zone -	单位面积风蚀模数 Wind erosion modulus per unit(t hm ⁻² a ⁻¹)		单位面积防风固沙服务量 Sand fixation service per unit/ (t hm ⁻² a ⁻¹)		单位面积土壤水蚀模数 Soil water erosion modulus per unit/ (t hm ⁻² a ⁻¹)		单位面积土壤 保持服务量 Soil conservation service per unit/ (t hm ⁻² a ⁻¹)	
	平均	斜率	平均	斜率	 平均	斜率	平均	斜率
	Mean	Trend	Mean	Trend	Mean	Trend	Mean	Trend
东北华北区 Northeast and North China	2.01	-0.20	28.95	-2.92	2.73	0.15	8.70	0.39
风沙区 Windy sandy area	13.11	-1.04	53.31	-4.04	5.79	-0.09	10.48	0.24
黄土高原区 Loess Plateau	1.07	-0.06	6.06	-0.17	31.23	-1.93	54.76	1.23
西北荒漠区 Northwest desert area	30.71	-1.52	26.93	-1.47	11.82	0.37	9.30	0.16
合计 Total	20.69	-1.13	32.17	-2.20	10.37	0.08	12.31	0.28

漠区最高,约30.71 t/hm²,黄土高原丘陵沟壑区和东北华北平原农区最低,分别约为1.07 和2.01 t/hm²。近10年,全区单位面积土壤风蚀模数呈现减少趋势,减少速率为每年1.13 t/hm²,年平均风蚀模数下降了25.25%,其中减速最高的是西北荒漠区。甘肃西部与蒙新衔接区域、柴达木盆地等则呈现明显增加趋势。三北地区多年平均生态系统防风固沙服务量为32.17 t/hm²,其中风沙区最高,约53.31t/hm²,黄土高原丘陵沟壑

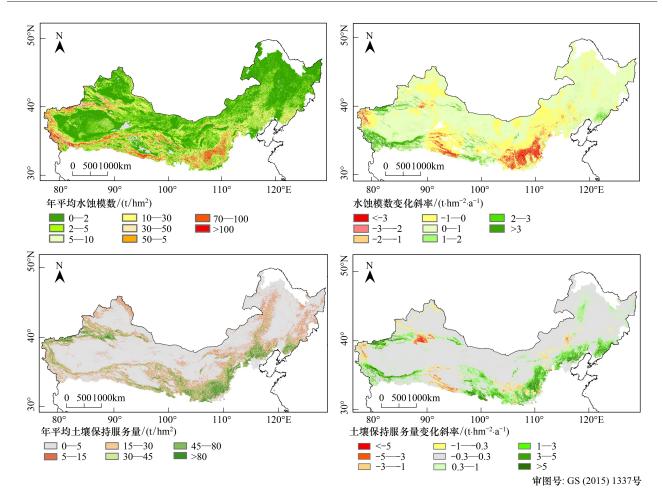


图 3 2000—2010 年三北地区风蚀模数与防风固沙服务量及其变化

Fig. 3 The ecosystem wind erosion modulus and volumes of wind prevention and sand fixation in the Three Northern Region in 2000-2010

区最低,约为 6.06 t/hm²。然而,近 10 年全区年平均防风固沙服务量则呈现减弱趋势,这与风蚀力逐年减弱有关,风蚀驱动力的减少使得裸土和植被覆盖条件下的土壤风蚀量明显减少,服务量也相对减少。但这并不能表明生态系统的防风固沙服务能力在降低,而仅仅表示在风蚀力减小的情况下,土壤防治的风蚀量也相应减少。

2.3.2 生态系统土壤保持服务及其变化

2000—2010年,三北地区水蚀区多年平均土壤水蚀模数为 10.37 t/hm²(表 4,图 4),其中黄土高原丘陵沟壑区最高,约 31.23 t/hm²,东北华北平原农区和风沙区最低,分别约为 2.73 和 5.79 t/hm²。近 10 年,全区土壤水蚀模数总体呈现微弱增加趋势,年增加速率为 0.08 t/hm²。而黄土高原区和风沙区的土壤水蚀模数则呈现降低趋势,特别是黄土高原区,年减少 1.93 t/hm²。三北地区水蚀区多年平均土壤保持服务量为 12.31 t/hm²,其中黄土高原丘陵沟壑区最高,约 54.76 t/hm²,东北华北平原农区和西北荒漠区最低,约为 8.7 和 9.3 t/hm²。近 10 年,单位面积生态系统土壤保持服务量呈现增加趋势,年增速 0.28 t/hm²,其中黄土高原区年增速达到 1.23 t/hm²。

2.4 三北地区生态系统变化的驱动力分析

2000—2010 年,三北地区气温以增温为主,年平均气温变化斜率为 0.02℃/年,特别是西北荒漠区。年降水量以增加趋势为主,变化斜率为 3.00mm/年,特别是东北华北平原农区(图 5,表 5)。适度增温、降水量增加有助于增加植被高度和生产力,加快植物物候进程,延长生长季,促进植物生长发育。近 10 年,三北地区人类扰动指数增加了 0.003(图 6,表 5),特别是风沙区和西北荒漠区,分别增加了 0.309 和 0.007,而东北华北平原

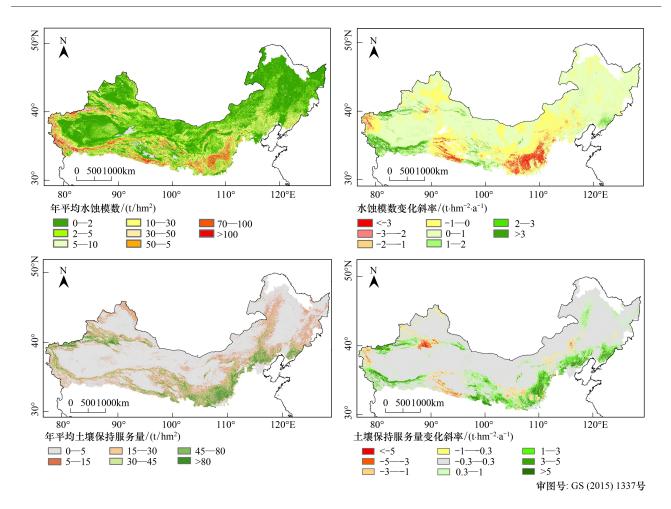


图 4 2000—2010 年三北地区土壤水蚀模数与土壤保持服务量变化

Fig. 4 The ecosystem water erosion modulus and volumes of soil conservation in the Three Northern Region in 2000-2010

农区和黄土高原丘陵沟壑区则呈现相反的减少趋势,分别减少了 0.151 和 0.005,说明人类活动对这两个区域 自然生态系统的扰动有所遏制,有利于植被恢复。

表 6 2000—2010 年三北地区生态系统变化驱动力因子及其变化统计

Table 6 The driving forces of ecosystem dynamics in the Three Northern Region in 2000-2010

区名 Zone	人类扰动指数 Human disturbance index			气温 Temperature		降水量 Precipitation	
	2000	2010	变化量 Change	多年平均 Mean(℃)	变化趋势 Trend/ (℃/a)	多年平均 Mean/mm	变化趋势 Trend/ (mm/a)
东北华北区 Northeast and North China	0.612	0.461	-0.151	3.39	0.01	564.81	10.89
风沙区 Windy sandy area	0.104	0.413	0.309	4.89	0.001	328.15	3.75
黄土高原区 Loess Plateau	0.471	0.466	-0.005	7.84	0.01	491.65	0.29
西北荒漠区 Northwest desert area	0.333	0.340	0.007	5.27	0.03	174.05	1.06
合计 Total	0.400	0.403	0.003	5.09	0.02	284.63	3.00

3 讨论与结论

本文分析了 2000—2010 年我国三北地区生态系统宏观结构、质量及关键服务变化状况及其驱动因素,得到几点结论:

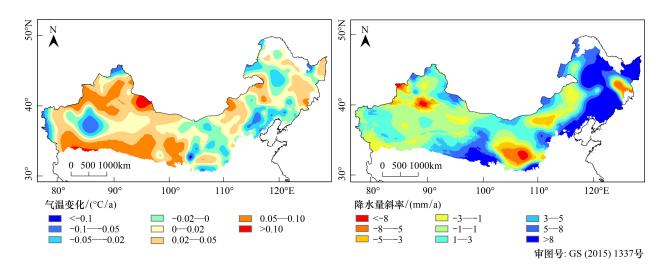


图 5 1990—2010 年三北地区气温、降水量变化分布图

Fig. 5 The distribution map of temperature and precipitation variation in the Three Northern Region in 2000-2010

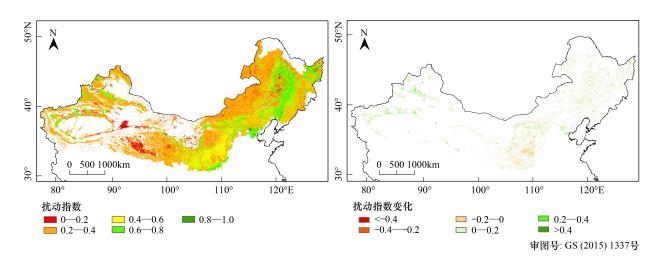


图 6 2000—2010 年三北地区人类扰动指数及其变化分布图

Fig.6 The human disturbances index and its change in the Three Northern Region in 2000-2010

首先,三北地区林地面积持续增加,草地面积持续减少。根据林业统计年鉴,2000—2010年,三北防护林体系工程完成人工造林面积达 4.61 万平方公里。而本文结果显示 10 年间,林地面积净增加了 0.69 万 km²,由其他类型转变为林地的面积为 1.13 万 km²,仅占统计面积的 24.51%,主要原因是三北防护林中的农田防护林、公路大绿化和村旁植树难以遥感识别。

10年间,三北地区生态系统质量和服务能力有所提升,NDVI、LAI、植被生产力总体呈现轻微增加趋势,特别是黄土高原丘陵沟壑区,然而植被覆盖度总体呈现微弱减少趋势,部分区域的植被覆盖度呈现增长趋势,特别是陕甘宁地区,而新疆北部、内蒙古东部等植被覆盖度呈下降趋势。近10年,三北地区由于风蚀力逐年减弱导致土壤风蚀模数降低,同时生态系统防风固沙服务量也呈现减弱趋势。水蚀区土壤水蚀模数总体呈现微弱增加趋势,而生态系统土壤保持服务量呈现增加趋势。

从过去 10 年三北地区生态系统时空变化可以看出,近 40 年的生态工程在三北地区生态建设中发挥了极为重要的作用,但也存在较多问题,本区多为干旱半干旱区,很多地方抽取地下水喷灌、滴灌造林,甚至移土造林、在山地草甸上造林,不仅成本高、成活率也低,破坏了草地原生植被,而且不可持续。因此,未来三北地区生态建设应该基于"宜乔则乔、宜灌则灌、宜草则草、宜荒则荒"原则,优先保护优良、原生生态系统,以自然恢

复为主。此外,如何科学正确地评估三北地区生态工程的生态效应,是调整后续工程措施的主要依据,也是未来的研究重点。

参考文献 (References):

- [1] 聂浩刚,张维吉,李智佩,岳乐平,王岷.中国三北地区荒漠化与可持续发展.地球科学与环境学报,2005,27(4):63-70.
- [2] 李智佩, 岳乐平, 聂浩刚, 王岷, 孙虎, 王飞跃. 中国三北地区荒漠化区域分类与发展趋势综合研究. 西北地质, 2002, 35(4): 135-153.
- [3] 申元村. 我国"三北"防护林地区土地资源及其开发潜力探讨. 地理研究, 1994, 13(2); 20-26.
- [4] 张泽秀, 刘利民, 贾燕, 李秀芬. 三北地区防护林气候生态适应性分析. 生态学杂志, 2009, 28(9): 1696-1701.
- [5] 张桂英,姜秀萍,王丽娟,周光会,张钰,刘佳.三北防护林工程建设前后科尔沁沙地环境变化.中国农学通报,2014,30(5):181-184.
- [6] 王强, 张勃, 戴声佩, 张芳芳, 赵一飞, 尹海霞, 何旭强. 三北防护林工程区植被覆盖变化与影响因子分析. 中国环境科学, 2012, 32 (7): 1302-1308.
- [7] 王晓慧,陈永富,陈尔学,张元应,雒艳兰.基于遥感和 GIS 的三北防护林工程生态效益评价研究——以山西省中阳县为例. 水土保持通报,2011,31(5):171-175.
- [8] Yao Y J, Liang S L, Zhao S H, Zhang Y H, Qin Q M, Cheng J, Jia K, Xie X H, Zhang N N, Liu M. Validation and application of the modified satellite-based priestley-taylor algorithm for mapping terrestrial evapotranspiration. Remote Sensing, 2014, 6(1): 880-904.
- [9] 王效瑞, 范建华, 汪祥森. "三北"防护林地区主要树种的分布与水、热条件的关系. 生态学杂志, 1986, 5(1): 13-17, 37.
- [10] 郑晓、朱教君、基于多元遥感影像的三北地区片状防护林面积估算。应用生态学报、2013、24(8): 2257-2264.
- [11] 郑晓,朱教君,闫妍.三北地区农田防护林面积的多尺度遥感估算.生态学杂志,2013,32(5):1355-1363.
- [12] 吴云,曾源,吴炳方,李晓松,武文波.基于 MODIS 数据的三北防护林工程区植被覆盖度提取与分析.生态学杂志,2009,28(9): 1712-1718.
- [13] Duan H C, Yan C Z, Atsushi Tsunekawa, Song X, Li S, Xie J L. Assessing vegetation dynamics in the Three-North Shelter Forest region of China using AVHRR NDVI data. Environmental Earth Sciences, 2010, 64(4): 1011-1020.
- [14] 王强, 张勃, 戴声佩, 邹悦, 马中华, 张亚宁. 基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的三北防护林工程区植被覆盖动态变化. 资源科学, 2011, 33(8): 1613-1620.
- [15] 黄森旺,李晓松,吴炳方,裴亮.近25年三北防护林工程区土地退化及驱动力分析.地理学报,2012,67(5):589-598.
- [16] 姬翠翠. 基于遥感和 GIS 的三北地区水土流失动态监测研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2009.
- [17] 王晓慧, 陈永富, 陈尔学. 近 30 年三北防护林工程区中阳县土壤侵蚀变化分析. 西北林学院学报, 2012, 27(5): 1-5.
- [18] 侯庆春,黄旭,韩仕峰,张孝忠.黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究 I 小老树的分布及其生长特点.水土保持学报,1991,5 (1):64-72.
- [19] 朱教君,姜凤岐,范志平,周新华.林带空间配置与布局优化研究.应用生态学报,2003,14(8):1205-1212.
- [20] 姜凤岐,于占源,曾德慧,朱教君. 气候变化对三北防护林的影响与应对策略. 生态学杂志, 2009, 28(9): 1702-1705.
- [21] Christopher S Potter, James T Randerson, Christopher B Field, Pamela A Matson, Peter M Vitousek, Harold A Mooney, Steven A Klooster. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811-841.
- [22] Fryrear D W, Krammes C A, Williamson D L, Zobeck T M. Computing the wind erodible fraction of soils. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 49(2): 183-188.
- [23] Liu J Y, Qi Y Q, Shi H D, Zhuang D F, Hu Y F. Estimation of wind erosion rates by using ¹³⁷Cs tracing technique: A case study in Tariat-Xilin Gol Transect, Mongolian Plateau. Chinese Sciences Bulletin, 2008, 53(5): 751-758.
- [24] 沙占江,马海州,李玲琴,樊启顺,吴非权.基于遥感和¹³⁷CS方法的半干旱草原区土壤侵蚀量估算.中国沙漠,2009,29(4):589-595.
- [25] 郑兵,吕伟,姚洪林,海拉苏,张连根,孟令东. 浑善达克沙地南缘风蚀量的研究. 干旱区资源与环境, 2010, 24(6): 112-117.
- [26] 王云超, 张立峰, 侯大山, 高运青. 河北坝上农牧交错区不同下垫面土壤风蚀特征研究. 中国农学通报, 2006, 22(8): 565-568.
- [27] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [28] McCool D K, Brown L G, Foster G R, Mutchler C K, Meyer L D. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. Transactions of the ASAE, 1987, 30(5): 1387-1396.
- [29] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes. Transaction of American Society of Agriculture Engineers, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [30] 蔡崇法,丁树文,史志华,黄丽,张光远.应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究. 水土保持学报,2000,14(2):19-24.
- [31] 赵国松,刘纪远,匡文慧,欧阳志云. 1990-2010 年中国土地利用变化对生物多样性保护重点区域的扰动. 地理学报, 2014, 69(11): 1640-1650.