

黄麟, 祝萍, 肖桐, 等. 近 35 年三北防护林体系建设工程的防风固沙效应[J]. 地理科学, 2018, 38(4): 600-609. [Huang Lin, Zhu Ping, Xiao Tong et al. The Sand Fixation Effects of Three-North Shelter Forest Program in Recent 35 Years. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(4): 600-609.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.04.014

近 35 年三北防护林体系建设工程的防风固沙效应

黄麟¹, 祝萍^{1,2}, 肖桐³, 曹巍¹, 巩国丽⁴

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所/陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094; 4. 山西省环境规划院, 山西 太原 030024)

摘要:通过分析三北工程区生态系统防风固沙服务量变化,进而评价工程的防风固沙效应。结果表明:①近 35 a, 三北工程区林地面积持续增加、草地面积持续减少,特别是半干旱风沙区和黄土高原区。植被覆盖度在前 20 a 持续增加,近 15 a 则呈现先下降而后略微增加趋势。②土壤风蚀模数持续减少,近 15 a 减幅远高于前 20 a, 沙地、草地、其它类型转林地或转草地区域的减幅尤为明显。生态系统防风固沙服务保有率呈上升态势,干旱荒漠区增幅显著。草地和沙地为工程区生态系统防风固沙服务总量贡献了 71%,且转草地区域的贡献高于转林地区域。③考虑到植被好转同时受气候变化和人类活动的影响,以风场减弱为主的气候变化导致土壤风蚀力减弱与三北防护林等生态工程对生态系统防风固沙服务变化的贡献率分别介于 85%~89%和 11%~15%之间。

关键词:三北防护林体系建设工程;林地、草地面积变化;植被覆盖度;防风固沙

中图分类号:K903 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0690(2018)04-0600-10

中国三北地区属中纬度干旱半干旱区,广布沙地、草原和旱地,是中国沙漠化防治重点区^[1]。脆弱生态系统在气候波动和人类不合理活动的作用下形成沙漠化正逆过程^[2-4],春季地面回缓解冻,地表裸露,多细沙尘土,狂风起时沙尘弥漫,在本地及狂风经过地带形成沙尘天气^[5,6]。中国沙尘源的主要风沙路径中,影响中国西部地区的西线源自中亚干旱区和中国新疆,而对华北地区构成直接威胁的是源自蒙古高原西部、甘肃省西部、黄土高原北部的西北线,以及源自蒙古国中南部、内蒙古中东部和河北北部的北线^[5,7]。20 世纪中后期,大规模开垦草原和过度放牧导致草原区植被大面积破坏,出现了大面积沙丘活化,为沙尘活动提供了丰富的沙尘来源,叠加春季干燥强风天气,加剧北方风沙危害的强度和频度^[3,5]。

1979 年,中国开始在风沙危害、水土流失严重的西北、华北、东北地区建设带、片、网相结合防护林体系,即三北防护林体系建设工程(简称“三北工程”)。工程规划至 2050 年,提高森林覆盖率,

沙区治理沙化土地并减少风沙危害,水土流失区降低土壤侵蚀模数,平原区构建农田防护林体系等^[8,9]。20 世纪末以来,全球变暖导致亚洲大陆中纬度地区冬季风明显减弱^[10,11],加之相继实施了退耕还林(草)、退牧还草、京津风沙源治理等生态工程,使中国三北地区植被有所恢复^[12,13],近年沙尘天气的强度和频度出现了明显地下降^[5,6]。

随着多期三北工程的实施,我们需要了解工程是否达到了预期的成效,目前已取得的成效是否可以持续。大量研究认为三北工程的效果,直接体现为治理沙化土地、抵御风沙侵袭、保护农田和恢复牧场等,间接体现在防风及降低风速、调节水热、改善小气候、提高作物产量^[14-16],保持水土、防风固沙、涵养水源^[17,18]、固碳释氧^[19,20]等。然而,三北地区降水量不足、蒸发量过大、风大且持续日数长,违背植被地带性分布规律的重乔轻灌草,出现土壤水分亏缺与肥力不足形成“小老头树”^[21,22],干旱胁迫或爆发病虫害从而出现了造林成活率低、成活不成林或成林不成材、生产力水平低、生

收稿日期:2017-03-23; **修订日期:**2017-05-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0506500)、中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDB-SSW-DQC005)资助。[Foundation: National Key Research and Development Program of China (2017YFC0506500), Key Research Program of Frontier Sciences of CAS (QYZDB-SSW-DQC005).]

作者简介:黄麟(1981-),女,四川宜宾人,副研究员,博士,主要从事土地利用变化及其生态效应研究。E-mail: huanglin@igsnr.ac.cn

长缓慢,停滞甚至枯死等衰退现象^[17,18,23]。

由于缺乏系统、全面和准确的长时间序列生态系统变化时空信息,同时在三北工程成效的监测和评估技术方法上存在较大的差距,使得我们只能从一些诸如治理面积、植被覆盖度等表象特征上评价生态系统的变化状况,受年度间气候等因素的影响而产生明显的不确定性,使评价结果有失偏颇;同时,这种简单的评价指标难以揭示生态系统变化的原因和今后的发展趋势,直接影响到工程的科学决策与滚动实施。因此,本文针对三北工程总体规划目标,基于长时间序列生态系统变化数据,构建量化的生态系统防风固沙服务指标,分析近35 a三北工程对植被恢复及其防风固沙作用的影响,快速、科学地评估工程的防风固沙效应。

1 数据与方法

1.1 数据收集与处理

土地覆被变化数据:基于1970年代末、1990、2000、2010、2015年陆地卫星MSS、TM/ETM+、环境小卫星等图像数据,经图像精纠正和拉伸处理后,根据刘纪远等^[24]的方法,通过遥感解译判读,生成4个时段的土地覆被变化数据,对主要土地利用/覆被类型空间数据进行统计分析,得到不同时段林地、草地等面积变化数据。

植被覆盖度数据:收集1982~2002年AVHRR和2000~2015年MODIS的1 km NDVI数据,对重叠年份采用线性回归的方法校正AVHRR的NDVI数据,利用NDVI计算半月尺度的植被覆盖度。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,根据如下公式估算植被覆盖度:

$$F_c = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (1)$$

式中, F_c 为植被覆盖度, $NDVI_{veg}$ 是纯植被像元的NDVI值, $NDVI_{soil}$ 是完全无植被覆盖像元的NDVI值。

气象台站观测数据:从中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)下载国家台站的日均风速、降水量、温度、日照时数等,温度和降水量采用软件ANUSPLIN插值、风速采用Kriging插值,插值数据作为模型输入数据。同时,利用研究区内240个国家气象台站日均风速分析1970~

2015年风速时空变化特征,这些台站不包括缺测站(年缺测日数>20 d)及影响代表地区平均风速的山风口站点(阿拉山口、七角井、华家岭等)。

其它模型输入数据:从中国西部环境与生态科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)下载中国雪深长时间序列数据、1:100万土壤类型及属性空间数据。从地球系统科学数据共享服务网(<http://www.geodata.cn>)下载全国1:400万土壤碳酸钙含量分布数据。

1.2 防风固沙服务评价方法

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)估算区域尺度土壤风蚀模数^[25,26]。

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

$$Q_{max} = 109.8(WF \times EF \times SCF \times K' \times COG) \quad (3)$$

式中, M_w 表示土壤风蚀模数, x 表示地块长度, Q_x 表示 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; SCF 示土壤结皮因子; K' 表示土壤粗糙度因子,反映地表对风速减弱作用及对风沙活动的影响,即地表抗风蚀的能力,其大小取决于地表粗糙元的性质,通过文献参数整理得到草地、沙地、农田等类型的土壤粗糙度因子值; COG 表示植被因子,为枯萎植被、直立残茬和生长植被覆盖的土壤流失比率的乘积。

$$WF = \frac{\sum_{i=1}^N WS_2(WS_2 - WS_i)^2 \times N_d \rho}{N \times g} \times SW \times SD \quad (4)$$

式中, WS_2 为2 m处风速(m/s), WS_i 为2 m处临界风速; N 为风速观测次数(一般500次),由于日均风速数据达不到500次,且滤掉了瞬间高风速,使得估算结果偏小,为此采用郭中领等^[27]的降尺度方法提高风速数据时间分辨率; N_d 为试验天数; ρ 为空气密度(kg/m³), g 为重力加速度(m/s²); SW 为无量纲的土壤湿度因子; SD 为雪覆盖因子,即计算时段内积雪覆盖深度大于25.4 mm的概率。

$$EF = \frac{29.09 + 0.31S_a + 0.17S_i + 0.33\frac{S_a}{C_i} - 2.59OM - 0.95CaCO_3}{100} \quad (5)$$

$$SCF = \frac{1}{1 + 0.0066(C_i)^2 + 0.021(OM)^2} \quad (6)$$

式中, S_a 为土壤砂粒含量, S_i 为土壤粉砂含量, C_l 为土壤粘土含量, OM 为有机质含量, $CaCO_3$ 为碳酸钙含量。

估算结果利用已发表基于地面测定的不同区域风蚀模数^[28-31]进行验证。

通过生态系统防风固沙服务量(S_w)衡量生态系统削弱风力、降低风蚀量的防风固沙能力,定义为极度退化状态与实际地表覆盖条件土壤风蚀量的差值。防风固沙服务量能够表征植被作用引起的风蚀减少量,但受气候因素的影响不能说明植被对减小风蚀的贡献作用大小,并不能有效凸显生态系统本身对固沙的贡献率,为了消除气候波动的影响,将现实土壤风蚀量与地带性顶级植被条件下土壤风蚀量的比值定义为防风固沙服务保有率(B),用于评价生态系统的防风固沙效应。

$$S_w = S_s - S_r \quad (7)$$

$$B = \frac{S_s}{S_D} \times 100\% \quad (8)$$

式中, S_r 表示极度退化状态下的潜在土壤风蚀量, S_D 表示地带性顶级植被条件下的土壤风蚀量, S_s 表示实际地表覆盖条件下的现实土壤风蚀量。

1.3 工程和气候的影响辨识方法

通过对比平均气候状况和真实气候状况下的土壤风蚀量、防风固沙服务量和服务保有率,可以厘定气候变化、生态工程等人类活动对工程区生态系统变化的作用。真实气候状况下,指标变化反映了气候变化和生态工程的综合影响。而平均气候状况下,即估算时输入多年平均气候要素得到的指标变化,由于气候要素不变,可以认为与气候变化无关,主要反映生态工程等人类活动的影响。具体表示如下:

$$C_{project} = \frac{|G_R - G_A|}{G_R} \quad (9)$$

$$C_{nature} = 1 - \frac{|G_R - G_A|}{G_R} \quad (10)$$

式中, $C_{project}$ 是生态工程的贡献率, C_{nature} 是自然因素(气候变化为主)的贡献率, G_R 、 G_A 分别是真实气候状况和平均气候状况下的指标量。

2 结果与分析

2.1 宏观生态状况恢复效应

2.1.1 林地、草地面积变化

草地是三北工程区的主体生态系统,其面积

占比约 63.29%,其次是林地和耕地,分别占 16.33%和 13.99%。过去 30 多年,三北工程区内林地面积持续增加、草地面积持续减少。1970 年代末到 1990 年,林地面积净减少 $1.46 \times 10^4 \text{km}^2$,其中增加的林地主要分布在半湿润区(图 1a);草地面积净减少 $1.5 \times 10^4 \text{km}^2$,其中增加的草地主要在半干旱风沙区东北部。1990~2000 年,林地面积净减少 $0.78 \times 10^4 \text{km}^2$,草地面积净减少 $3.14 \times 10^4 \text{km}^2$,增加的林地和草地多分布在半干旱风沙区(图 1b)。2000~2010 年,林地面积净增加 $0.69 \times 10^4 \text{km}^2$,增加的林地多在半湿润区、半干旱风沙区西南端、黄土高原区以及干旱荒漠区北部;草地面积净减少 $0.13 \times 10^4 \text{km}^2$,增加的草地主要位于半干旱风沙区(图 1c)。2010~2015 年,林地面积净增加 $0.11 \times 10^4 \text{km}^2$,点状散布在干旱荒漠区和半干旱风沙区;草地面积净减少 $1.03 \times 10^4 \text{km}^2$,其中增加的草地主要分布在半干旱风沙区(图 1d)。

2.1.2 植被覆盖度变化

与 1980 年代相比,1990~2000 年三北工程区植被覆盖度增加了 1.5%,其中原有林地平均植被覆盖度提高了 3.59%,新增林地提高了 3.83%,草原区提高了 0.64%,其它类型转林地区(简称“转林区”)和其它类型转草地区(简称“转草区”)分别增加 0.65%和 0.88%。从空间格局来看,各区域平均植被覆盖度皆大幅增加,特别是半干旱风沙区,年增速 1.01%(图 2a, b)。2000~2010 年,三北工程区植被覆盖度呈现略微下降趋势,年减少 0.07%。然而,转草区植被覆盖度年增加 0.07%,耕地、沙地也略有增加。从区域来看,黄土高原区植被覆盖度持续提高,年增速 0.61%(图 2c)。2010~2015 年,三北工程区植被覆盖度年增加 0.11%。其中,林地、草地植被覆盖度由前 10 a 的减少趋势转为增加趋势,转草区年增速 0.96%,而转林区 0.11%。各区域植被覆盖度皆有增加(图 2d),半干旱风沙区年增速最高,约 0.31%。

2.2 生态系统防风固沙服务效应

20 世纪 90 年代,三北工程区土壤风蚀模数呈现减少趋势,平均每年减少 0.52t/hm^2 (表 1)。其中,林地土壤风蚀模数年减少 0.35t/hm^2 ,草地年减少 0.48t/hm^2 ,转林区年减少 0.42t/hm^2 ,转草区年减少 0.51t/hm^2 。与 20 世纪 80 年代相比,区域土壤风蚀模数均值皆有所增加。从空间格局看(图 3a, b),半干旱风沙区减速最为显著,其次是干旱荒漠

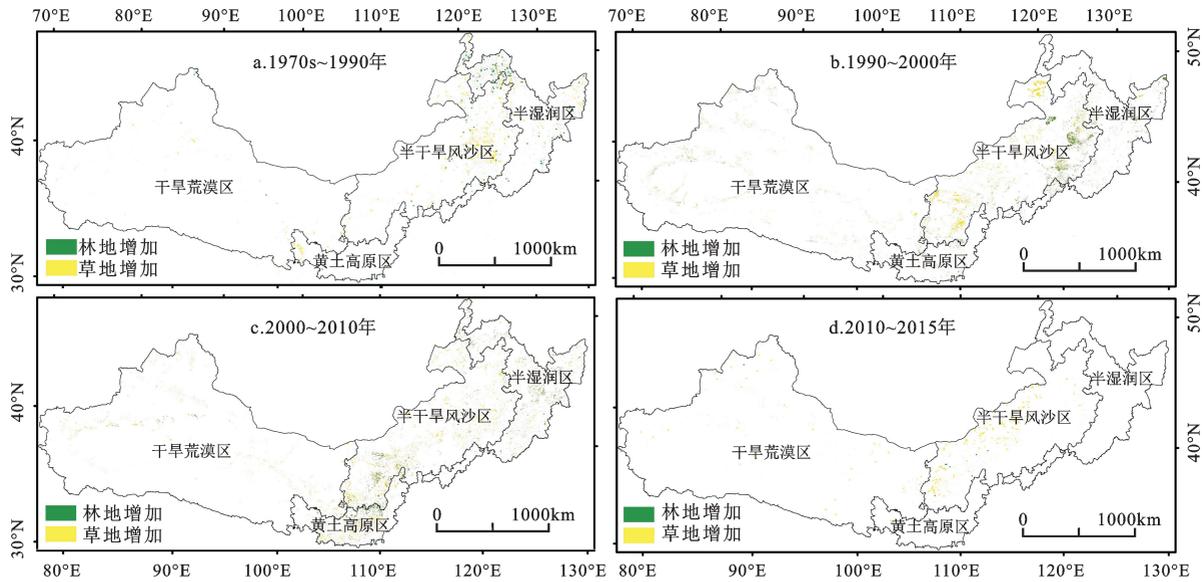


图1 20世纪70年代末到2015年三北工程区林地、草地时空变化分布
 Fig.1 The spatial and temporal change patterns of forest and grassland in 1970s-2015

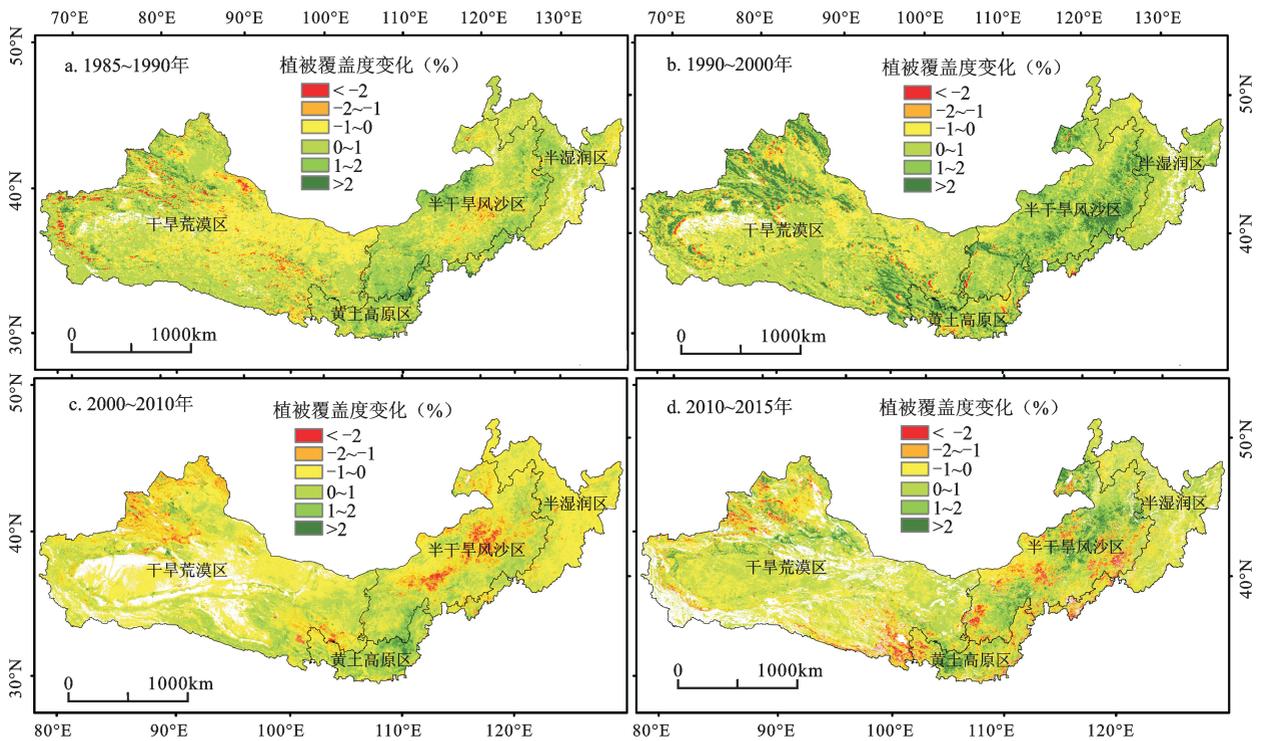


图2 1982~2015年三北工程区植被覆盖度变化趋势空间分布
 Fig.2 The spatial and temporal change patterns of vegetation coverage in 1982-2015

区。2000~2010年,土壤风蚀模数持续减少,平均每年减少1.24 t/hm²。其中,沙地减速尤为显著,年减少4.48 t/hm²,草地年减少0.95 t/hm²,转草区年减少1.46 t/hm²,转林区年减少0.52 t/hm²。2010~2015年,土壤风蚀模数年减少2.38 t/hm²。除林地

呈现增长态势外,其它类型皆减少,特别是转林区、转草区。除半湿润区以外,其它区域亦皆呈现减少趋势(图3c,d)。

20世纪90年代,三北工程区生态系统防风固沙服务量呈现减少趋势(表1),平均每年减少

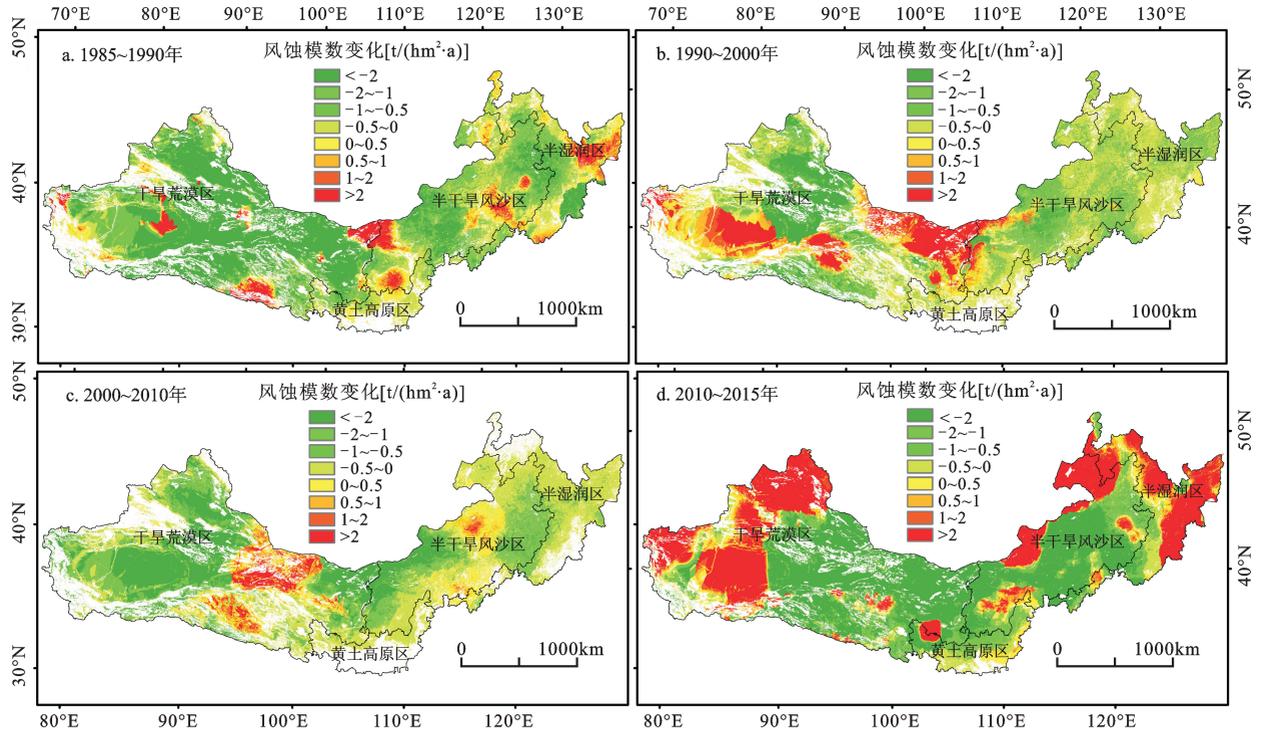


图3 三北工程区土壤风蚀模数变化趋势空间分布

Fig.3 The spatial and temporal change patterns of soil wind erosion modulus

表1 1985~2015年三北工程区生态系统防风固沙指标变化统计

Table 1 The statistics of ecosystem sand fixation indicators in 1985-2015

统计单元	土壤风蚀模数变化[t/(hm ² ·a)]				防风固沙服务量变化[t/(hm ² ·a)]			防风固沙服务保有率变化(%/a)		
	I	II	III	IV	II	III	IV	II	III	IV
林地	-0.52	-0.35	-0.16	1.82	-1.99	-3.08	1.95	0.32	-0.03	0.17
草地	-2.31	-0.48	-0.95	-0.96	-1.82	-2.56	-0.18	0.07	0.05	0.40
沙地	-21.46	-0.41	-4.48	-8.54	-2.02	-3.73	-4.72	-0.58	0.06	-0.28
耕地	-0.86	-0.62	-0.46	-0.35	-0.36	-2.67	-0.10	0.82	0.05	0.56
其它类型转林地		-0.42	-0.52	-2.13	-1.29	-1.64	-1.13	0.42	0.52	0.15
其它类型转草地		-0.51	-1.46	-3.61	-1.29	-3.60	-3.61	0.24	0.48	0.56
半湿润区	-0.50	-0.39	-0.20	3.19	-1.23	-2.96	3.19	0.48	-0.10	0.18
半干旱风沙区	-0.86	-0.61	-1.05	-1.58	-1.74	-4.10	-1.58	0.40	-0.01	0.48
干旱荒漠区	-7.70	-0.57	-1.75	-0.35	-1.22	-1.68	-0.35	-0.24	0.07	0.93
黄土高原区	-0.15	-0.08	-0.06	-4.32	-9.53	-0.19	-4.32	0.48	0.21	-0.04
三北工程区	-5.67	-0.52	-1.24	-2.38	-1.30	-2.40	-0.88	0.08	0.03	0.20

注: I :1985~1990年, II :1990~2000年, III :2000~2010年, IV :2010~2015年。

1.3 t/hm²。其中,林地年减少 1.99 t/hm²,草地年减少 1.82 t/hm²,转林区和转草区皆减少 1.29 t/hm²。与 80 年代相比,防风固沙服务量皆有所增加。2000 年以来,生态系统防风固沙服务量持续减少。2000~2010 年,减少 2.4 t/hm²。其中,沙地减速尤为显著,年减少 3.73 t/hm²,草地年减少 2.56 t/hm²,转

草区年减少 3.6 t/hm²,转林区年减少 1.64 t/hm²。2010~2015 年,每年减少 0.88 t/hm²,除林地增加以外,其它类型皆减少,除半湿润区以外,其他区域亦皆减少(图 4a, c, e)。在防风固沙服务总量的贡献中,由草地和沙地贡献 71%,转草区的贡献高于转林区。因此,就防风固沙服务而言,占主体位置

的草地和沙地的植被恢复,对生态系统防风固沙服务的提高发挥了最为重要的作用。

近35 a来,三北工程区生态系统防风固沙服务保有率呈现上升态势。1990~2000年,防风固沙服务保有率年增速0.08%(表1),除沙地略有下降以外,其它类型皆有所上升,特别是耕地和林地,年增速分别为0.82%和0.32%;转林区和转草区年增速分别达到了0.42%和0.24%。从空间格局看,除干旱荒漠区有所减少外,其它区域皆有增加(图4b)。

2000~2010年,防风固沙服务保有率年增速0.03%。除林地略有下降,其余类型皆有提高;转林区和转草区年增速分别达到了0.52%和0.48%;半湿润区、半干旱风沙区略有减少,黄土高原区和干旱荒漠区年增速分别为0.21%和0.07%(图

2.3 工程和气候的贡献率辨识

4d)。2010~2015年,生态系统防风固沙服务保有率年增速达0.2%,特别是转草区,年增加0.56%;除沙地有所减少以外,其它类型皆增加;除黄土高原区减少以外,其它区域也都增加(图4f)。

近几十年,中国风速呈下降趋势^[32,33],北方地区10 m高度风速以0.19 m/(s·10a)速度下降。风速下降原因主要归结为大尺度的大气环流与下垫面异常^[34,35]。亚洲冬季环流减弱导致中国冬季风速减小,而气候变暖背景下,东西向海陆气压梯度的减小使得冬、夏季风速皆减小^[10]。1970~1990年,三北工程区站点平均风速2.68 m/s,其中197个站点(约80%)风速呈现减小趋势(图5a);1990~2000年,站点平均风速2.46 m/s,137个站点(约

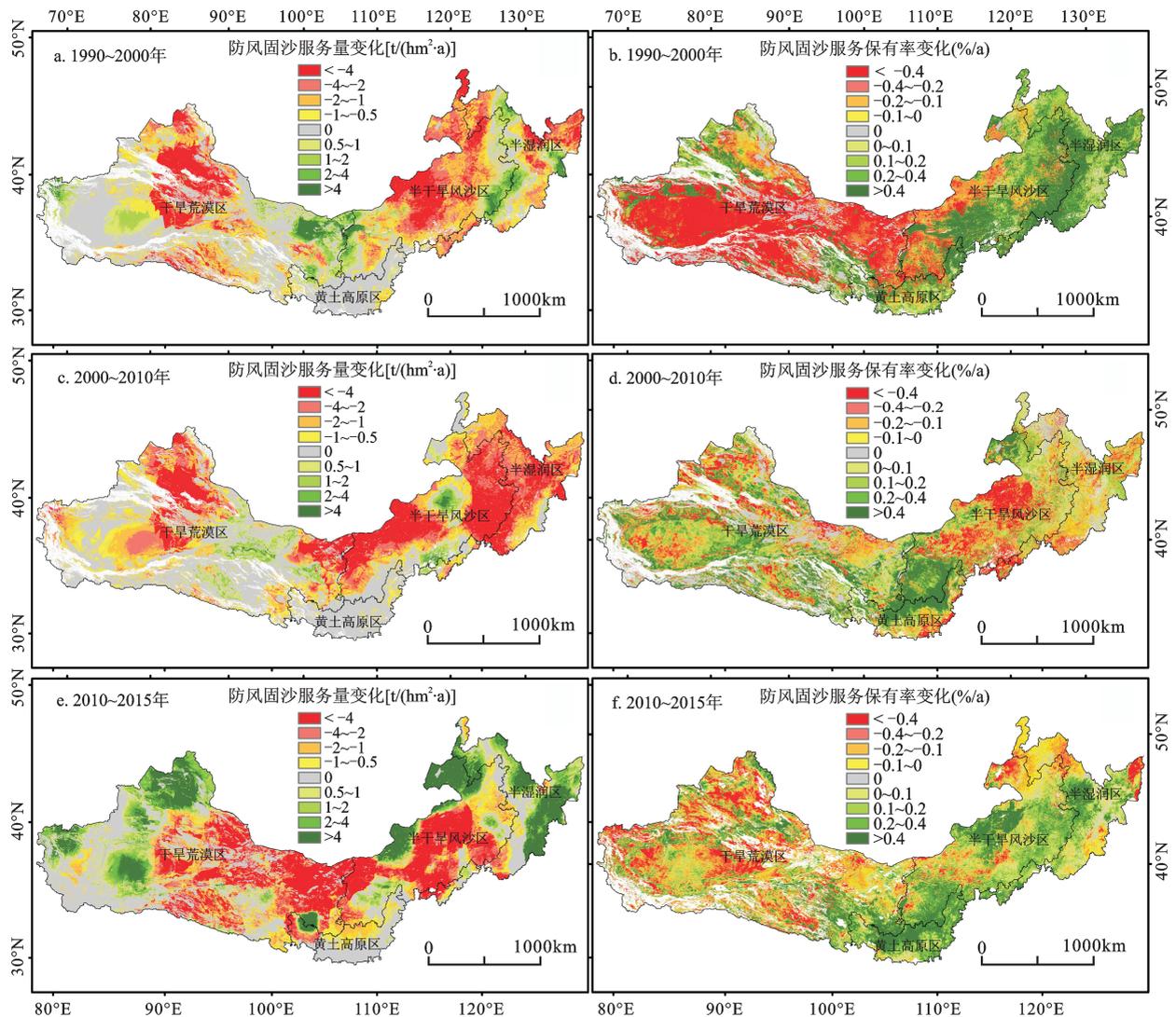


图4 三北工程区防风固沙服务量与服务保有率变化趋势空间分布
Fig.4 The spatial and temporal change patterns of ecosystem sand fixation effects

55%)风速减小(图5b);2000~2010年,站点平均风速2.42 m/s,126个站点(53%)风速减小(图5c);2010~2015年,站点平均风速2.37 m/s,122个(51%)站点风速减小(图5d)。

模型模拟结果表明(表2),1985~2000年,真实与平均2种气候状况下,以风速减弱为主的气候变化导致风力因子减小,土壤风蚀力减弱,从而土壤风蚀量降低,作用约89%,三北工程等导致局地植被好转从而减少土壤风蚀的作用约11%。2000~2015年,三北防护林等各项生态工程实施导致植被好转从而减少土壤风蚀量的贡献约15%,风速

减弱等气候因素变化的作用约85%。前、后2个15 a对比,气候变化背景下,生态工程等的正面作用凸显。

3 结论与讨论

论文通过分析三北工程区生态系统防风固沙服务指标变化,进而评价三北防护林体系建设工程的防风固沙效应。近35 a连续监测表明,三北工程区土壤风蚀模数持续减少,近15 a减幅远高于前20 a,沙地、草地及其它类型转林、转草区的减幅尤为明显。生态系统防风固沙服务保有率呈上

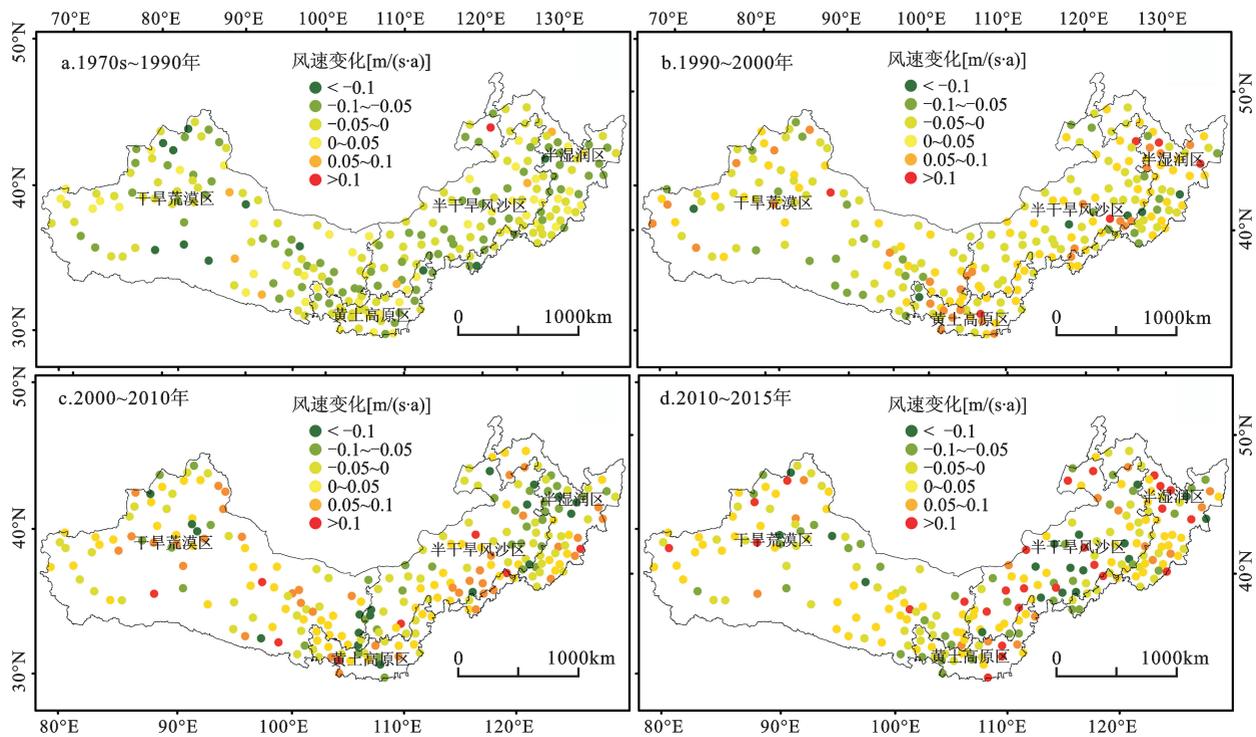


图5 1970s~2015年三北工程区风速变化空间分布

Fig.5 The spatial and temporal change patterns of wind speed in 1970s-2015

表2 三北工程区不同气候状况下指标量归因统计

Table 2 The impact attribution statistics under different climatic conditions

时段	指标	真实气候状况	平均气候状况	生态工程贡献率	气候变化贡献率(%)
1985~2000年	土壤风蚀量($\times 10^6\text{t}$)	117.04	104.51	10.71	89.29
	防风固沙服务量($\times 10^6\text{t}$)	193.28	213.53	10.48	89.52
	防风固沙服务保有率(%)	70.64	69.75	1.26	98.74
2000~2015年	土壤风蚀量($\times 10^6\text{t}$)	86.61	99.37	14.73	85.27
	防风固沙服务量($\times 10^6\text{t}$)	182.53	146.05	19.99	80.01
	防风固沙服务保有率(%)	71.23	68.48	3.86	96.14

升态势,干旱荒漠区增幅显著。草地和沙地为工程区生态系统防风固沙服务总量贡献了71%,且转草区的贡献高于转林区。

从土壤风蚀的时空分布来看,三北工程区风蚀量较大区域也是风场强度较高区域,且风蚀量集中在风速高值的春季。因此春季风场强度大幅减弱是风沙区风蚀量下降的一个重要原因。植被变化是加速或遏制土壤风蚀最敏感的因素,取决于气候因素与人类活动。因此,全球变暖导致亚洲大陆中纬度地区冬季风明显减弱,加之各类生态工程的实施,部分区域植被明显恢复,植被转好和风场减弱使得风蚀区土壤风蚀量减少,初步遏制了中国北方风沙危害加剧的趋势。本文初步结果得出气候变化等自然因素对土壤风蚀的影响超过90%,而生态工程恢复植被等的影响约10%。

近35 a,发挥区域防风固沙作用的主体是占工程区总面积63%以上的草地。草地和沙地植被的恢复对三北地区生态系统防风固沙服务的提高发挥了最为重要的作用。但是,过去的工程注重林地建设,据统计约80%资金投入造林,草地治理面积仅相当于林地治理面积的三分之一,并且针对草地恢复治理的资金较少,仍有发挥防风固沙作用的大面积退化、沙化草地未得到有效保护和治理。因此,应坚持“保护优先,自然恢复为主”的原则,遵循“宜林则林、宜灌则灌、宜草则草、宜荒则荒”等科学规律,建立生态保护与恢复的长效机制,重视草地在防风固沙屏障中的主体作用。

参考文献(References):

- [1] 王涛.我国沙漠化研究的若干问题——3.沙漠化研究和防治的重点区域[J].中国沙漠,2004,24(1):1-9. [Wang Tao. Study on sandy desertification in China—3. Key regions for studying and combating sandy desertification. Journal of Desert Research, 2004, 24(1):1-9.]
- [2] 马柱国.我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系[J].地球物理学报,2005,48(5):1011-1018. [Ma Zhuguo. Dry/wet variation and its relationship with regional warming in arid-regions of northern China. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(5):1011-1018.]
- [3] 董光荣,靳鹤龄,陈惠忠,等.中国北方半干旱和半湿润地区沙漠化的成因[J].第四纪研究,1998,18(2):136-144. [Dong Guangrong, Jin Heling, Chen Huizhong et al. Geneses of desertification in semiarid and subhumid regions of Northern China. Quaternary Sciences, 1998, 18(2): 136-144.]
- [4] 王训明,李吉均,董光荣,等.近50a来中国北方沙区风沙气候演变与沙漠化响应[J].科学通报,2007,52(24):2882-2888. [Wang Xunming, Li Jijun, Dong Guangrong et al. Climatic evolution and desertification response of sandstorm in the sandy area of Northern China in recent 50 years. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(24): 2882-2888.]
- [5] 叶笃正,丑纪范,刘纪远,等.关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策[J].地球科学进展,2000,15(4):513-521. [Ye Duzheng, Chou Jifan, Liu Jiyuan et al. Causes and countermeasures of dust weather in North China. Advances in Earth Science, 2000, 15(4): 513-521.]
- [6] 全林生,时少英,朱亚芬,等.中国沙尘天气变化的时空特征及其气候原因[J].地理学报,2001,56(4):477-485. [Quan Linsheng, Shi Shaoying, Zhu Yafen et al. Temporal-Spatial Distribution Characteristics and Causes of Dust-day in China. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(4): 477-485.]
- [7] 邱新法,曾燕.我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径[J].地理学报,2001,56(3):316-322. [Qiu Xinfu, Zeng Yan. Temporal-spatial distribution as well as tracks and source areas of sand-dust storms in China. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(3): 316-322.]
- [8] 国家林业局西北华北东北防护林建设局.中国三北防护林体系建设总体规划方案[M].银川:宁夏人民出版社,1993. [Shelterbelt Construction Bureau in Northwest, North and Northeast China. Main Plan for the Construction of the Three-North Shelterbelt System in China. Yinchuan: Ningxia People's Publishing House. 1993]
- [9] 国家林业局.三北防护林体系建设工程30年发展报告(1978-2008)[M].北京:中国林业出版社,2008. [State Forestry Administration of the People's Republic of China. Development report of the Three-North Shelter Forest System in the Past 30 Years (1978-2008). Beijing: China Forestry Publishing House, 2008.]
- [10] 江滢,罗勇,赵宗慈,等.近50年中国风速变化及原因分析[C].广州:中国气象学会2007年年会气候变化分会场论文集,2007:80-89. [Jiang Ying, Luo Yong, Zhao Zongci et al. Analysis on the change of wind speed in China in recent 50 years. Guangzhou: 2007 Annual Meeting Climate Change Session of Chinese Meteorological Society 2007: 80-89.]
- [11] 布和朝鲁.东亚季风气候未来变化的情景分析——基于IPCC SRES A2和B2方案的模拟结果[J].科学通报,2003,48(7):737-742. [Buhe Chaolu. Scenario analysis of future changes of east Asian monsoon climate——Simulation results based on IPCC SRES A2 and B2 schemes. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(7): 737-742.]
- [12] 吴云,曾源,吴炳方,等.基于MODIS数据的三北防护林工程区植被覆盖度提取与分析[J].生态学杂志,2009,28(9):1712-1718. [Wu Yun, Zeng Yuan, Wu Bingfang et al. Retrieval and analysis of vegetation cover in the Three-North Regions of China based on MODIS data. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(9): 1712-1718.]
- [13] 黄麟,曹巍,巩国丽,等.2000-2010年中国三北地区生态系统时空变化特征[J].生态学报,2016,36(1):107-117. [Huang

- Lin, Cao Wei, Gong Guoli et al. Spatial and temporal variations in ecosystems in the three northern regions of China, 2000-2010. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(1): 107-117.]
- [14] Torita H, Satou H. Relationship between shelterbelt structure and mean wind reduction [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2007, 145(3-4): 186-194.
- [15] Ryszkowski L, Kędziora A. Modification of water flows and nitrogen fluxes by shelterbelts [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 29(4): 388-400.
- [16] 代力民, 王宪礼, 王金锡. 三北防护林生态效益评价要素分析[J]. *世界林业研究*, 2000, 2: 47-51. [Dai Limin, Wang Xianli, Wang Jinxi. Indicators to assess the ecological effect of the 3-north windbreak system. *World Forestry Research*, 2000, 2: 47-51.]
- [17] 姜凤岐, 于占源, 曾德慧. 气候变化对三北防护林的影响与应对策略[J]. *生态学杂志*, 2009, 9: 1702-1705. [Jiang Fengqi, Yu Zhanyuan, Zeng Dehui. Effects of climate change on the Three-north Shelter Forest Program and corresponding strategies. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 9: 1702-1705.]
- [18] 朱金兆, 周心澄, 胡建忠. 对“三北”防护林体系工程的思考与展望[J]. *自然资源学报*, 2004, 1: 79-85. [Zhu Jinzhao, Zhou Xincheng, Hu Jianzhong. Thoughts and views about the three north shelterbelt program. *Journal of Natural Resources*, 2004, 1: 79-85.]
- [19] 龚维, 李俊, 何宇, 等. 发展林业碳汇推动三北防护林体系建设[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(9): 1691-1695. [Gong Wei, Li Jun, He Yu et al. Developing forestry carbon sinks to promote the construction of the Three-North Shelter Forest Program. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(9): 1691-1695.]
- [20] 张林, 王礼茂. 三北防护林体系森林碳密度及碳储量动态[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(8): 136-140. [Zhang Lin, Wang Limao. Dynamic forest carbon density and storage in the "Three North" protective forest system. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(8): 136-140.]
- [21] 陈云明, 梁一民, 程积民. 黄土高原林草植被建设的地带性特征[J]. *植物生态学报*, 2002, 26(3): 339-345. [Chen Yunming, Liang Yimin, Cheng Jimin. The zonal character of vegetation construction on Loess Plateau. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(3): 339-345.]
- [22] 侯庆春, 黄旭. 黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究—II 土壤水分和养分状况及其与小老树生长的关系[J]. *水土保持学报*, 1991, 4: 64-72. [Hou Qingchun, Huang Xu. Study on the genesis and transformation path of the small old tree in the Loess Plateau—II Soil moisture and nutrient status and its relationship with the growth of the old tree. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 4: 64-72.]
- [23] 宋立宁, 朱教君, 闫巧玲. 防护林衰退研究进展[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(9): 1684-1690. [Song Lining, Zhu Jiaojun, Yan Qiaoling. Review on the shelter forest decline. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(9): 1684-1690.]
- [24] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14. [Liu Jiyuan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14.]
- [25] Fryrear D W, Saleh A, Bilbro J D et al. Revised Wind Erosion Equation (RWEQ) [R]. Wind Erosion and water conservation research unit, USDA-ARS. Southern Plains Area Cropping Systems Research Laboratory, Technical Bulletin 1, 1998.
- [26] 巩国丽. 中国北方土壤风力侵蚀研究[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2014. [Gong Guoli. Study on soil wind erosion in Northern China. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 2014.]
- [27] 郭中领. RWEQ模型参数修订及其在中国北方应用研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2012. [Guo Zhongling. Revision on model parameters of RWEQ and its application in Northern China. Beijing: Beijing Normal University, 2012.]
- [28] 刘纪远, 齐永青, 师华定, 等. 蒙古高原塔里亚特-锡林郭勒样带土壤风蚀速率的¹³⁷Cs示踪分析[J]. *科学通报*, 2007, 52(23): 2785-2791. [Liu Jiyuan, Qi Yongqing, Shi Huading et al. Estimation of wind erosion rates by using ¹³⁷Cs tracing technique: A case study in Tariat-Xilin Gol transect, Mongolian Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(23): 2785-2791.]
- [29] 王云超, 张立峰, 侯大山, 等. 河北坝上农牧交错区不同下垫面土壤风蚀特征研究[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(8): 565-568. [Wang Yunchao, Zhang Lifeng, Hou Dashan et al. Study on soil wind erosion of different underlying in ecotone between agriculture and animal husbandry in Bashang of Hebei. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(8): 565-568.]
- [30] 严平, 董光荣, 张信宝, 等. ¹³⁷Cs法测定青藏高原土壤风蚀的初步结果[J]. *科学通报*, 2000, 45(2): 199-204. [Yan Ping, Dong Guangrong, Zhang Xinbao et al. Preliminary results of the study on wind erosion in the Qinghai-Tibetan Plateau using ¹³⁷Cs technique. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(2): 199-204.]
- [31] 郑兵, 吕伟, 姚洪林, 等. 浑善达克沙地南缘风蚀量的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(6): 112-117. [Zheng Bing, Lv Wei, Yao Honglin et al. The wind erosion characteristics of south region of Hunshandake sandland. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(6): 112-117.]
- [32] Fu G B, Yu J J, Zhang Y C et al. Temporal variation of wind speed in China for 1961-2007[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2011, 104: 313-324.
- [33] Jiang Y, Luo Y, Zhao Z C et al. Changes in wind speed over China during 1956-2004[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 99: 421-430.
- [34] 赵宗慈, 罗勇, 江滢. 全球大风在减少吗?[J]. *气候变化研究进展*, 2011, 7(2): 149-151. [Zhao Zongci, Luo Yong, Jiang Ying. Is global Strong Wind Declining? *Advances in Climate Change Research*, 2011, 7(2): 149-151.]

[35] 陈练. 气候变暖背景下中国风速(能)变化及其影响因素研究 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2013:49-80. [Chen Lian. Study on the change of wind speed and its influencing factors in Chi-

na under the background of climate warming. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013:49-80.]

The Sand Fixation Effects of Three-North Shelter Forest Program in Recent 35 Years

Huang Lin¹, Zhu Ping^{1,2}, Xiao Tong³, Cao Wei¹, Gong Guoli⁴

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Satellite Environment Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, China; 4. Shanxi Academy of Environmental Planning, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract: In order to understand the windbreak and sand fixation effects of the Three-North Shelter Forest Program (TNSFP) in recent 35 years, this paper analyzes the amount change of ecosystem sand fixation caused by climate change and vegetation degradation or restoration in the project region, and then assesses the sand fixation effects of the Program. Based on Landsat MSS, TM/ETM+, and environmental satellite (HJ) images, the spatial-temporal datasets of land cover changes in the project region of TNSFP were analyzed in the periods of mid 1970s, 1990, 2000, 2010, 2015, especially the forest and grassland. Combining the NDVI data of AVHRR and MODIS, the vegetation coverage was estimated, and then the change of vegetation coverage in the 1982–2015 was analyzed. The soil erosion modulus were estimated at the regional scale by applying the soil erosion equation (RWEQ), and then the ecosystem services of windbreak and sand fixation were assessed using indicators of amount and retention rate of windbreak and sand fixation. Then the contribution rate of ecological program and climate change to regional ecosystem change was determined by comparing the indexes under the conditions of average climate and real climate. The results showed that: 1) In the past 35 years, the area of forest was continuously increased and grassland was decreased, especially in the semi-arid sandy area and Loess Plateau. The vegetation coverage increased continuously in the before 20 years, and then decreased in recent 15 years. 2) The soil wind erosion modulus is decreased continuously, and the decreasing rate in recent 15 years is much higher than that in the before 20 years. The decreasing rates were especially obvious in sandy land, grassland, and regions planting trees and grassland. The retention ratio of ecosystem windbreak and sand fixation service also increased continuously, especially in arid desert area. Grassland and sandy land contributed 71% of the total amount of windbreak and sand fixation. However, just 6.6% of forest land, and the contribution of conversion grassland was higher than that of conversion forest. 3) In the TNSFP, the weakening of wind erosion force due to reducing wind, and the vegetation restoration in local areas due to TNSFP and other ecological programs, both resulted in a decrease of soil wind erosion, and accounted for 85%–89% and 11%–15% of the decrease. Winter monsoon in mid-latitude Asian is weakened due to global warming. In the project region of TNSFP, the grassland played the most important role in ecosystem service of windbreak and sand fixation, which accounts for more than 63% of the total area. Therefore, the conservation of grassland and sandy land were significant in project region of TNSFP. Project planning and implementation should focus on the transfer of funds from afforestation to grassland conservation and restoration.

Key words: the Three-North Shelter Forest Program; forest and grassland area change; vegetation coverage; windbreak and sand fixation effects