

# 近 35 年松嫩沙地风沙—植被动态演变及模拟预测

王良玉, 社会石

(吉林师范大学 旅游与地理科学学院, 吉林 四平 136000)

**摘要:**在全球气候变化与人类活动影响下,松嫩沙地风沙—植被发生了明显变化。基于 Landsat 系列影像与该区气象、社会经济数据,分析了 1980—2015 年松嫩沙地风沙—植被动态演变过程及驱动因素,并对其未来发展变化进行了模拟预测。结果表明:近 35 a 该区风沙地貌面积呈波动增加趋势,净增 355.00 km<sup>2</sup>,变幅 21.43%,其中 2000 年达最大值,而后持续减少;植被覆盖面积总体减少了 812.29 km<sup>2</sup>,其中,高、低植被覆盖区面积呈波动减少趋势,分别减少了 7 919.35,15 479.84 km<sup>2</sup>,而中植被覆盖区面积呈增加趋势,净增 22 587.90 km<sup>2</sup>;风沙覆盖面积与低植被覆盖区面积呈显著负相关。根据预测,到 2020 年松嫩沙地风沙地貌面积仍呈减少趋势,植被覆盖面积有所增加,尤其低植被覆盖区面积增长明显,达 4 292.95 km<sup>2</sup>。松嫩沙地风沙—植被动态演变受控于区域气候变化和社会经济发展,且与社会经济因素相关性较强。研究为松嫩沙地风沙治理及区域持续发展提供科学依据。

**关键词:**风沙地貌; 植被覆盖; 动态演变; 模拟预测; 松嫩沙地

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)04-0380-06

## Dynamic Evolution and Simulation Prediction of Aeolian Vegetation in Songnen Sandy Land in Recent 35 Years

WANG Liangyu, DU Huishi

(College of Tourism and Geographical Science, Jilin Normal University, Siping, Jilin 136000, China)

**Abstract:** Under the influence of global climate change and human activities, aeolian sand-vegetation has changed obviously in Songnen Sand Land. Based on the Landsat series images, the meteorological and socio-economic data of the study area, the dynamic evolution process and driving factors of aeolian sand—vegetation were analyzed in Songnen Sandy Land during 1980 to 2015. Then the future development of the vegetation was simulated and predicted. The results showed that, the area of aeolian sandy landform increased by 355.00 km<sup>2</sup> in recent 35 years, with increase rate of 21.43%, which reached up to the maximum in 2000, and then continued to decrease; the vegetation area decreased by 812.29 km<sup>2</sup>, while the area of high and low vegetation area fluctuated downward, and decreased by 7 919.35 km<sup>2</sup> and 15 479.84 km<sup>2</sup>, respectively; The middle vegetation coverage area increased with net increase of 22 587.90 km<sup>2</sup>; the sand cover area was negatively correlated with the area of low vegetation coverage. According to prediction, the area of aeolian sandy landform in Songnen Sandy Land showed the decreasing trend in 2020, while the vegetation coverage increased, the low vegetation coverage area increased by 4 292.95 km<sup>2</sup>. The dynamic evolution of aeolian sand—vegetation in Songnen Sandy Land was controlled by regional climate change and social economic development, and had a strong correlation with social and economic factors. This study can provide scientific basis for sandstorm control and regional sustainable development in Songnen Sandy Land.

**Keywords:** aeolian geomorphology; vegetation coverage; dynamic evolution; model forecasting; Songnen Sandy Land

干旱半干旱区风沙—植被相互作用关系得到了国内外相关学者的关注<sup>[1-4]</sup>,学者对其展开相关研究

的科学假设是,在干旱半干旱沙区,植被通过改变近地表气流中的风动量、风速和截留部分沙物质来改

造、控制近地面风沙活动,而风沙流又通过侵蚀或掩埋等方式影响植被生长。松嫩沙地位于东北平原中西部,地处典型农牧交错带,该区生态环境脆弱,地表景观演化对全球气候变化和区域人类活动响应敏感,近几年,该区风沙地貌与植被覆盖变化明显,是研究风沙—植被作用机理的理想靶区。有关风沙活动与植被条件的耦合关系,学者已获得一定认识,如植被覆盖在一定程度上改变了沙粒的运动方式、风蚀速度、以及风速廓线高度<sup>[5-6]</sup>,且随植被盖度的增加,地面粗糙度不断增大<sup>[7]</sup>,而不同植被覆盖度对风速流场的阻碍和改变作用不同<sup>[8]</sup>,进而导致输沙率及侵蚀堆积格局的空间差异<sup>[9]</sup>。但目前,多数研究皆局限于室内风洞模拟试验,而基于特定地理单元的持续监测研究较少。因此,亟需针对某一流域自然地理单元,以风沙—植被的相互关系为切入点,开展长时间序列遥感监测研究,以揭示风沙—植被的竞争与平衡关系,深入理解风沙—植被相互作用机理与地表景观演化过程<sup>[10]</sup>。鉴于此,本文以松嫩沙地为研究对象,基于3S技术和数理统计方法,研究该区风沙—植被地表景观时空演化特征,并对其发展变化进行预测,以探讨在气候变化和人类活动影响下的半干旱区风沙—植被相互作用关系,为区域沙漠治理与生态恢复提供科学参数。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

松嫩沙地位于松嫩平原中西部(119°19′33″—129°12′24″E,43°0′28″—50°36′51″N),面积约35.26万km<sup>2</sup>。该区属半干旱半湿润气候,年均温3.3℃,年降水量360~480mm,降水变率大,年内分配不均。年大风日数20~36d,春季大风日数占全年大风日数的60%~68%。地带性土壤为黑钙土;非地带性土壤为风沙土、草甸土、沼泽土和盐碱土。地带性植被为贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)和线叶菊(*Filifolium sibiricum*);非地带性植被为榆树疏林草原,乔木由耐旱的家榆(*Ulmus pumila*)、拉塌榆(*U. macrocarpa* var. *suberosa*)和黄榆(*Ulmus macrocarpa*)组成,灌木主要有山杏(*Armeniaca sibirica*),有的地段可见小黄柳(*Salix flavida*)和叶底珠(*Securinega suffruticosa*)<sup>[11]</sup>。覆沙区主要位于研究区中西部,分布于嫩江及其支流、第二松花江、洮儿河、霍林河等河流的河漫滩、一级阶地和冲洪积扇上。行政区划上包括呼伦贝尔市、兴安盟、齐齐哈尔市、大庆市、绥化市、哈尔滨市、白城市、松原市、长春市、吉林市等市(县)部分地区。

### 1.2 数据源与数据预处理

选取1980年、1990年、2000年、2010年、2015年Landsat MSS, TM和OLI晴空影像,获取时间为植被生长旺季的8月中旬—9月中旬。利用ERDAS 2010软件对各期单波段影像进行波段融合(layer stack),对同期影像做直方图匹配处理(histogram match),以部分消除太阳高度角或大气影响造成的相邻图像的颜色差异,再对各期影像做几何精校正(误差控制在一个像元内),并将同期影像做拼接处理,最后按研究区范围对其进行掩膜裁剪。

### 1.3 研究方法

1.3.1 面向对象沙地提取 基于面向对象方法提取沙地信息<sup>[12]</sup>,为确保多期影像中沙地的光谱信息、几何形状、纹理特征与其他对象的关系能够被充分利用,选用200的分割尺度对各期影像数据进行多尺度分割(multi-resolution segmentation)。由于Landsat系列影像大部分是混合像元,地物的形状较模糊,与光谱特征相比,形状特征对影像分割的影响程度较小,故将形状异质性 $h_{shape}$ 和光谱异质性 $h_{color}$ 的权重参数分别设置为0.1,0.5。近红外、红光、绿光波段都参与沙地信息提取,重要性相同,将各波段权重值设置为1。基于eCognition 9.0软件平台,完成沙地信息分割。分类的总体精度为90.2%,kappa系数为0.88。

1.3.2 植被覆盖计算 植被覆盖度遥感反演采用混合像元分解法,直接利用原始数据经归一化处理得到的植被指数来反演植被覆盖信息,模型为<sup>[13]</sup>:

$$F = \left[ \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \right]^2 \quad (1)$$

式中: $F$ 为植被覆盖度; $NDVI_{soil}$ 为完全是裸土或无植被覆盖区域的NDVI值; $NDVI_{veg}$ 则代表完全被植被覆盖的像元的NDVI值,即纯植被像元的NDVI值<sup>[14]</sup>。

对于大部分裸地, $NDVI_{soil}$ 值理论上应该接近于0;植被达到全覆盖状态时, $NDVI_{veg}$ 值接近于1。受时间、地域等各种自然条件差异影响,需采用归一化植被指数(NDVI-Normalized Difference Vegetation Index)来确定不同影像的 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 值,通过分析Landsat系列影像的NDVI数据,结合松嫩沙地的现实状况和NDVI值的累积概率分布表,确定置信度为0.5%~99.5%来计算植被覆盖度<sup>[15]</sup>。考虑农田是一特殊植被区,解译时将其进行剔除。

根据已有文献<sup>[16]</sup>对植被覆盖度的划分标准,以及松嫩沙地立地条件,将研究区植被覆盖度划分为3个等级,即低覆盖度( $F \leq 30\%$ )、中覆盖度( $30\% < F \leq 60\%$ )和高覆盖度( $F > 60\%$ )。

1.3.3 CA-Markov模型介绍 若随机过程在有限的时序 $t_1 < t_2 < t_3 < \dots < t_n$ 中,任意时刻 $t_n$ 的状态 $a_n$

只与其前一时间刻  $t_{n-1}$  的状态  $a_{n-1}$  有关,称该过程具有马尔柯夫性,该过程为马尔柯夫过程。在土地覆被变化预测中,将某一时刻的土地覆被类型对应于 Markov 过程中的可能状态,土地覆被类型间相互转换的比例即为状态转移概率。可用下式进行预测<sup>[17]</sup>:

$$S_{(t+1)} = P_{ij} \times S_{(t)} \quad (2)$$

式中: $S_{(t)}$ 、 $S_{(t+1)}$  分别为  $t$ 、 $t+1$  时刻土地覆被系统的状态; $P_{ij}$  为状态转移矩阵。

而 CA 模型的特点是时间、空间、状态都离散,每个变量都只有有限个状态,而且状态改变的规则在时间和空间上均表现为局部特征。CA 模型可用下式表达:

$$S_{(t+1)} = f(S_{(t)}, N) \quad (3)$$

式中: $S$  表示元胞有限、离散的状态集合; $t$ 、 $t+1$  表示不同时刻; $N$  表示元胞的邻域; $f$  表示局部空间的元胞转化规则。

CA-Markov 耦合模型把元胞自动机和马尔柯夫 (Markov) 模型结合起来,综合了 Markov 模型长期预测的优势和 CA 模拟复杂系统空间变化的能力,具有较高的科学性与实用性<sup>[18]</sup>。在栅格图中,每个像元视为一个元胞,每个元胞的土地覆被类型为元胞的状态,元胞的当前状态及邻居状况决定下一时期该元胞的状态。具体实现过程如下:

(1) 确定转换规则。将研究区解译矢量数据转换为栅格格式,通过 GIS 叠置分析,得到景观类型转移概率矩阵、转移面积矩阵和条件概率图像。

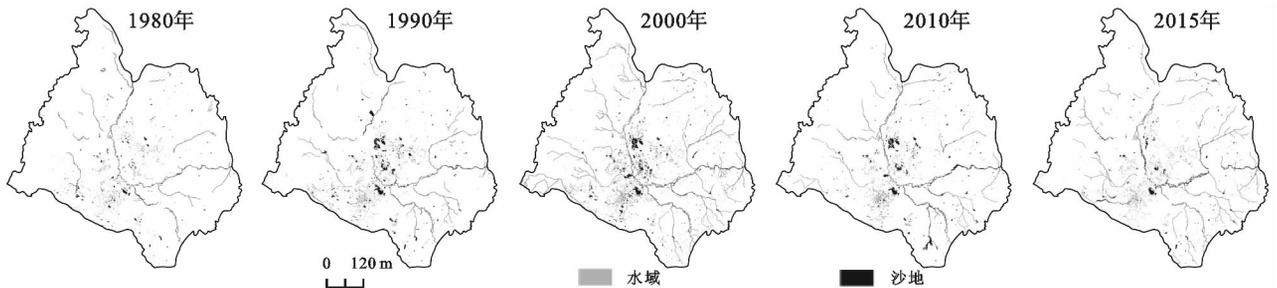


图 1 松嫩沙地风沙地貌动态演化

## 2.2 松嫩沙地植被覆盖变化

近 35 a 松嫩沙地植被覆盖区面积总体呈减少趋势,净减 812.29 km<sup>2</sup>。其中,低植被覆盖区和高植被覆盖区面积波动减少,而中植被覆盖区面积波动增加(图 2)。低植被覆盖区面积,以 2000 年为分割点,经历了先快速减少而后明显增加的变化过程,总体上,由 1980 年的 57 550.78 km<sup>2</sup> 缩减至 2015 年的 42 069.94 km<sup>2</sup>,变幅 -26.90%;中植被覆盖区域则呈现增加—减少—增加规律,近 35 a 面积增幅 49.10%;而高植被覆盖区面积呈先增加后减少趋势,2000 年面积达最大值 112 317.64 km<sup>2</sup>,近 35 a 总体变化了 7.14%。

(2) 构造 CA 滤波器。根据邻居和元胞距离的远近创建具有显著空间意义的权重因子,使其作用于元胞,从而确定元胞的状态改变。本文采用 5×5 滤波器,即认为一个元胞周围 5×5 个元胞组成的矩形空间对该元胞状态的改变具有显著影响。

(3) 确定起始时刻和迭代次数。以 2010 年土地覆被格局为基础,选择循环次数,模拟 2015 年风沙与植被景观格局,用于检验精度;以 2015 年实际景观格局为基础,对未来进行预测。

## 2 结果与分析

### 2.1 松嫩沙地风沙地貌演化

松嫩沙地风沙地貌主要分布于研究区中西部(图 1),近 35 a 面积呈波动增加趋势,由 1980 年的 1 655.79 km<sup>2</sup> 增至 2015 年的 2 010.79 km<sup>2</sup>,变化幅度为 21.43%。1980 年该区沙地面积较小,主要分布在研究区中西部和东北部;1990 年东北部沙地因开垦成农田而锐减,沙地重心整体向西南迁移;2000 年南部沙地面积持续增加且分布较为集中,风沙地貌面积达最大值,为 2 132.05 km<sup>2</sup>;2010 年研究区中部沙地面积有所减少;而到 2015 年,南部沙地面积也持续减少,沙地重心向东北部迁移。总体来看,1980—2000 年沙地面积持续增加,净增了 475.26 km<sup>2</sup>,该时期松嫩沙地荒漠化现象加重;而 2000—2015 年沙地面积持续缩减,变幅 -5.64%,荒漠化程度减缓明显。

### 2.3 松嫩沙地景观演变模拟预测

2.3.1 模型精度评估 利用 CA-Markov 模型,仿真 2015 年松嫩沙地景观格局,用于评估模型精度。具体计算过程为:通过 GIS 叠置分析,得到 2000—2010 年研究区沙地和各植被覆盖度区域转移面积矩阵和转移概率矩阵(步长为 1 a),将转移概率矩阵作为转换规则参与模拟运算;利用 IDRISI 平台的多标准评价模块(multi-criteria evaluation, MCE)创建沙地与植被适宜性图集,通过模糊评判方法完成其适宜性评价;基于 5×5 邻近滤波器,将 2010 年作为模拟起点,迭代次数取 5,即可仿真 2015 年研究区风沙—植被空间分布特征。常用的模型精度评估方法有地

面调查验证、抽样统计验证和图形对比验证法。本文采用图形对比法,将2015年仿真结果与该年解译数据进行地图代数,求得模拟的精度为89.04%,运算结果可信度较高。

2.3.2 松嫩沙地景观格局情景预测 以2015年影像解译数据为基础,对2020年沙地分布范围和各植被覆盖度区域进行情景预测(图3)。根据预测,到2020年,该区沙地面积比2015年减少37.55 km<sup>2</sup>,减少幅度为1.87%。植被覆盖区域,整体呈增加趋势,其中高植被覆盖面积略增,变化了914.93 km<sup>2</sup>;中植被覆盖面积增加了2 103.26 km<sup>2</sup>,变化幅度3.07%;低植被覆盖面积增加明显,达4 292.95 km<sup>2</sup>。研究区风沙面积

减少、植被覆盖面积增加,沙漠化逆转趋势明显。

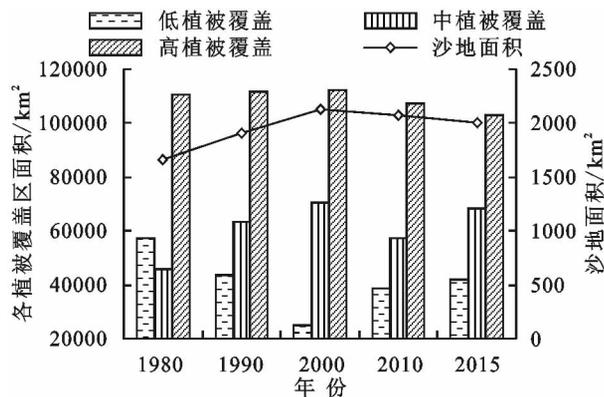


图2 松嫩沙地植被覆盖面积和沙地面积变化

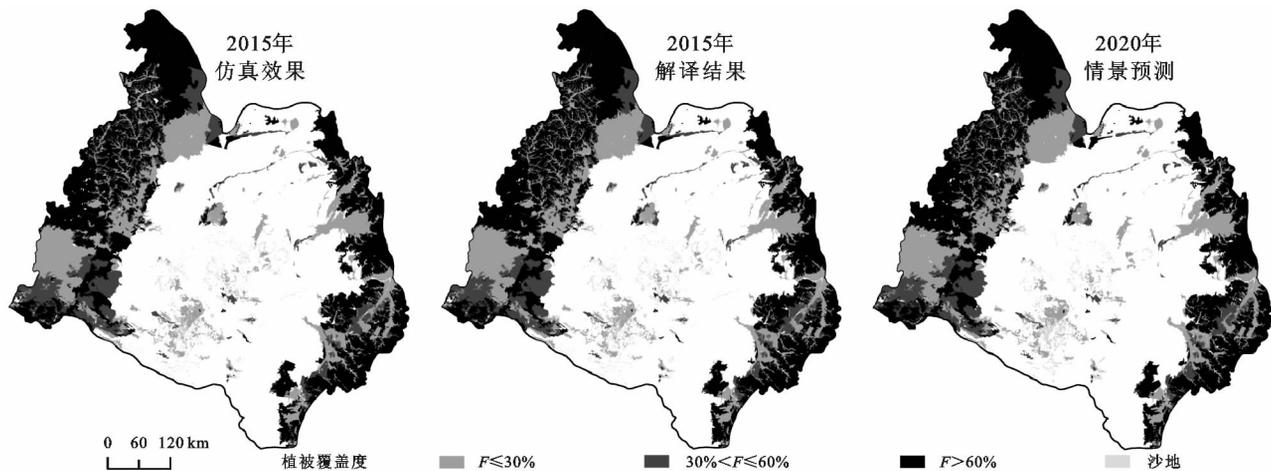


图3 松嫩沙地景观情景模拟

## 3 讨论

### 3.1 松嫩沙地风沙—植被相互作用关系

近35 a松嫩沙地植被覆盖面积呈波动减少趋势,风沙面积呈波动增加趋势,这与王涛等<sup>[19]</sup>的研究结果一致。风沙地貌演变与植被覆盖变化是半干旱区重要地表过程<sup>[20]</sup>,风沙活动和植被覆盖间存在着一定的竞争和动态平衡关系<sup>[21]</sup>。学者在库布齐沙漠等地开展的沙丘和植被研究表明,植被通过控制近地表面气流的强度和方向,影响输沙能力大小和沉积物的搬运方向,进而影响侵蚀堆积格局特征,并最终引起沙丘空间位置和形态的变化;而随着植被覆盖度的减少,输沙量和沙表面风速逐渐增大、地表侵蚀力度不断加强,风沙活动速度加强<sup>[22]</sup>。风洞试验也表明,植被覆盖可影响近地表风沙流粒度、结构和风蚀量<sup>[23]</sup>;此外,植物的根茎对沙表面有一定的固结作用,可以使截获的沙物质堆积下来,促进沙丘系统中植物的生长发育,控制沙丘形态及其发育演化,而风沙流通过风蚀或堆积也改变了沙丘植被的空间分布及群落演替<sup>[24]</sup>。

对风沙地貌与植被覆盖面积进行 Pearson 相关分析发现(表1),不同级别植被覆盖度面积与风沙地

貌面积都具有负关联,这与董治宝等<sup>[25]</sup>研究结果一致,但只有低植被覆盖达到了较显著的水平(双尾检验在0.05水平以上),这主要与风蚀作用强弱有关,沙地风蚀率随植被盖度的降低而增加,植被覆盖度较低时,地表粗糙度下降,沙面一定高度的风速逐渐增强,砂粒不易沉积,风蚀作用更为强烈<sup>[26]</sup>。杨文斌等<sup>[8]</sup>提出的低覆盖度治沙理论,也证明了植被覆盖降低时可形成独特的风速流场结构。

表1 沙地面积与不同植被覆盖级别的关联分析

项目	植被	低植被覆盖	中植被覆盖	高植被覆盖
	总面积	$F \leq 30\%$	$30\% < F \leq 60\%$	$F \geq 60\%$
沙地面积	-0.612	-0.929*	-0.421	-0.222

注:\*代表 Sig. < 0.05, 下表同。

### 3.2 松嫩沙地风沙—植被变化对气候变化和人类活动的响应

近35 a松嫩沙地年降水量波动减少(图4A)、年均温波动增加(图4B),气候暖干化趋势明显,这与贺伟<sup>[27]</sup>、孙凤华<sup>[28]</sup>等对东北地区气候变化研究的结果一致,气温升高、降水略减、潜在蒸发量增加,可导致沙地面积扩张。此外,区内总人口波动增加,增长率38.76%(图4C),对粮食需求不断增加,耕地面积不断扩大(图

4D)。短期高强度的人类活动可加速或延缓沙地和植被的演化速度,郭坚等<sup>[29]</sup>的调查研究也显示人口压力过大,土地的过度开垦影响着沙地荒漠化的发展速度。

松嫩沙地风沙地貌面积与降水量、年末大牲畜数呈负相关,与年均温、人口、耕地面积呈正相关,但是只有人口达到了较显著的水平(双尾检验在 0.05 水平以上)。植被覆盖面积与降水量、年均温、耕地面积、年末大牲畜数均呈正相关,与人口因素呈负相关,并且与人为因素的相关程度均达到了 0.60 以上(表 2)。这说明松嫩沙地风沙—植被面积变化与该地区气候变化和人类活动具有较好的相关性。

表 2 沙地面积、植被面积与气候因素和人为因素的关联分析

项目	降水量	年均温	人口	耕地面积	年末大牲畜数
沙地面积	-0.241	0.371	0.906*	0.771	-0.862
植被面积	0.556	0.370	-0.660	0.668	0.882

## 4 结论

近 35 a 松嫩沙地风沙面积整体呈增长趋势,净增 355.00 km<sup>2</sup>,变化幅度 21.43%,1980—2000 年沙地面积呈扩张趋势,荒漠化加剧;2000—2015 年沙地面积减少,荒漠化程度有所减缓。植被覆盖面积总体呈波动减少趋势,净减 812.29 km<sup>2</sup>,其中高植被覆盖和低植被覆盖面积分别减少了 7 919.35,15 479.84 km<sup>2</sup>,中植被覆盖面积增加了 22 587.9 km<sup>2</sup>。根据预测,到 2020 年风沙地貌面积呈下降趋势,比 2015 年减少了 1.87%;植被面积呈增加趋势,尤其是低植被覆盖面积增加明显,荒漠化逆转趋势明显。

相关分析表明,沙地面积和植被覆盖面积具有较好的相关性,尤其与低植被覆盖显著相关。风沙—植被动态演变与社会经济因素相关性较强,但气候变化也起到了至关重要的作用。为防止沙地面积扩大,协调人与自然关系,亟需保护沙地植被资源,合理调整土地利用结构,实现区域可持续发展。

### 参考文献:

- [1] 王雪芹,蒋进,雷加强,等. 古尔班通古特沙漠短命植物分布及其沙面稳定意义[J]. 地理学报,2003,58(4):598-605.
- [2] 武正丽,贾文雄,刘亚荣,等. 近 10 a 来祁连山植被覆盖变化研究[J]. 干旱区研究,2014,31(1):80-87.
- [3] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes [J]. Nature,1974,18(4):167-187.
- [4] Grant P F, Nickling W G. Direct field measurement of wind drag on vegetation for application to sandbreak design and modeling[J]. Land Degradation and Development, 1998,9:57-65.
- [5] 张萍. 风沙—植被相互作用的景观效应[D]. 北京:北京师范大学,2012.
- [6] 石雪峰. 北方半干旱区风沙活动与植被条件的耦合关系

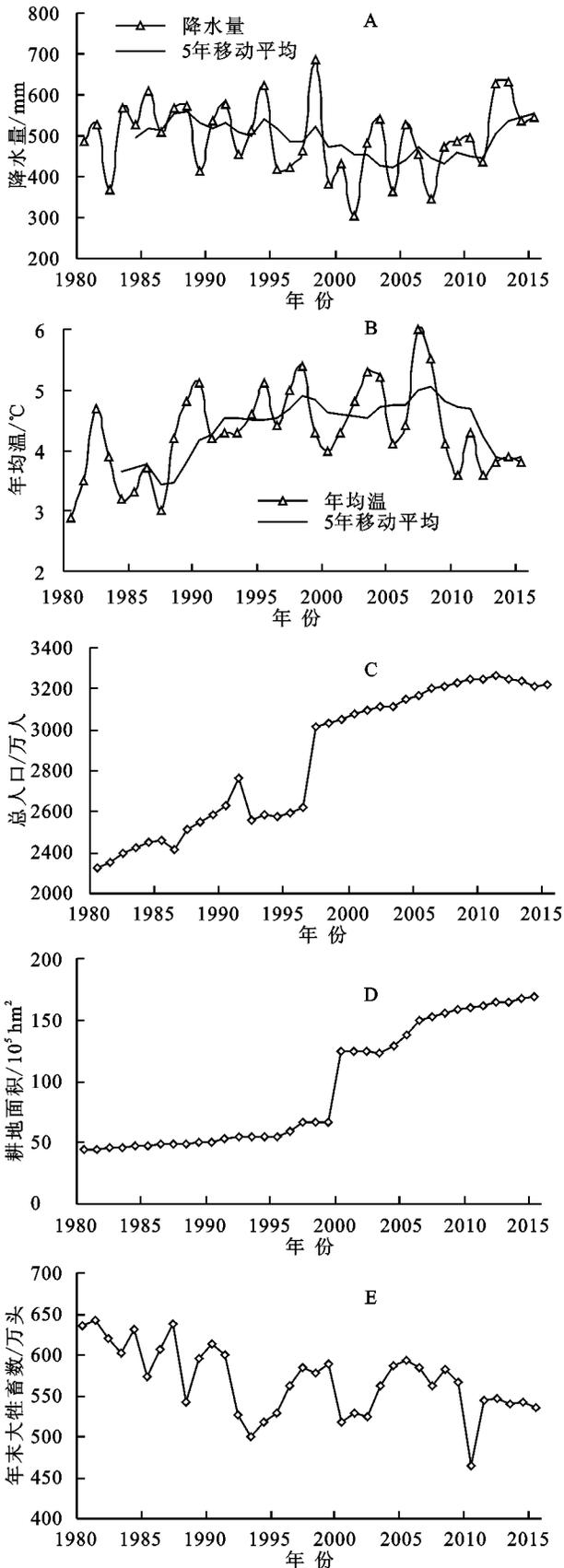


图 4 松嫩沙地气象和社会经济数据

- [D]. 北京:中央民族大学,2005.
- [7] 马士龙. 植被覆盖对土壤风蚀影响机理的研究[D]. 北京:北京林业大学,2006.
- [8] 杨文斌,王涛,冯伟,等. 低覆盖度治沙的理论与沙漠科技进步[J]. 中国沙漠,2017,37(1):1-6.
- [9] Lancaster N, Bass A C W. Influence of vegetation cover on sand transport by wind: field studies at Owens Lake, California[J]. *Earth and Surface Processes and Landforms*, 1998(23):69-82.
- [10] 社会石. 库布齐沙漠沙丘动态变化研究[D]. 北京:北京师范大学,2013.
- [11] 辛未冬. 松嫩沙地固定沙丘土壤动物群落特征及其在凋落物分解中的作用研究[D]. 长春:东北师范大学,2011.
- [12] 张森,陈健飞,龚建周. 面向对象分类的决策树方法探讨[J]. 测绘科学,2016,41(6):117-121.
- [13] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998,19(8):1533-1543.
- [14] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(3): 241-252.
- [15] 温小乐,李洋,林征峰. 海岛建设引发的植被覆盖度变化的遥感分析[J]. 地球信息科学学报,2017,19(2): 273-280.
- [16] 白淑英,吴奇,史建桥,等. 基于时间序列遥感数据的西藏山南地区植被覆盖变化特征分析[J]. 中国沙漠, 2015,35(5):1396-1402.
- [17] 吴晶晶,田永中,许文轩,等. 基于CA-Markov模型的乌江下游地区土地利用变化情景分析[J]. 水土保持研究,2017,24(4):133-139.
- [18] 杨国清,刘耀林,吴志峰. 基于CA-Markov模型的土地利用格局变化研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2007,32(5):414-418.
- [19] 王涛,宋翔,颜长珍,等. 近35 a来中国北方土地沙漠化趋势的遥感分析[J]. 中国沙漠,2011,31(6):1351-1356.
- [20] 李振山,王怡,贺丽敏. 半干旱区植被风沙动力过程耦合研究: I. 模型[J]. 中国沙漠,2009,29(1):23-30.
- [21] 张萍,哈斯,杜会石,等. 抛物线形沙丘与油蒿灌丛之间的动态关系[J]. 科学通报,2011,56(35):3003-3010.
- [22] Yang T, Cao J, Wang Y, et al. Soil moisture influences vegetation distribution patterns in sand dunes of the Horqin Sandy Land, Northeast China[J]. *Ecological Engineering*, 2017,105:95-101.
- [23] 俞祥祥,李生字,马学喜,等. 沙漠公路防护林影响下近地表风沙流粒度特征的空间分异[J]. 水土保持研究, 2017,24(1):334-341.
- [24] Telfer M W, Hesse P P, Perez-Fernandez M, et al. Morphodynamics, boundary conditions and pattern evolution within a vegetated linear dunefield [J]. *Geomorphology*, 2017,290:85-100.
- [25] 董治宝,陈渭南,董光荣,等. 植被对风沙土风蚀作用的影响[J]. 环境科学学报,1996,16(4):437-443.
- [26] 钟卫,孔纪名,杨涛. 植被沙障对近地表风沙流特征影响的风洞试验[J]. 干旱区研究,2009,26(6):872-876.
- [27] 贺伟,布仁仓,熊在平,等. 1961—2005年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报,2013,33(2):519-531.
- [28] 孙凤华,杨素英,陈鹏狮. 东北地区近44年的气候暖干化趋势分析及可能影响[J]. 生态学杂志,2005,24(7): 751-755.
- [29] 郭坚,王涛,薛娴,等. 松嫩沙地荒漠化现状和原因[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(5):101-105.

~~~~~

(上接第379页)

- [7] 程艳,黎小东,敖天其. 古蔺河流域农村非点源污染综合评估[J]. 环境工程,2016(S1):114-118.
- [8] 丁晓雯,沈珍瑶. 涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别[J]. 环境科学,2012,33(11):4025-4032.
- [9] 刘瑞民,沈珍瑶,丁晓雯,等. 应用输出系数模型估算长江上游非点源污染负荷[J]. 农业环境科学学报,2008, 27(2):677-682.
- [10] 薛利红,杨林章. 面源污染物输出系数模型的研究进展[J]. 生态学杂志,2009,28(4):755-761.
- [11] 马广文,王业耀,香宝,等. 长江上游流域土地利用对面源污染影响及其差异[J]. 农业环境科学学报,2012,31 (4):791-797.
- [12] 陆珊,代俊峰,周作旺. 基于等标污染负荷法的生活和农业污染源分析[J]. 节水灌溉,2015(2):45-46.
- [13] 张蓉. 农用地利用方式与非点源污染控制政策研究 [D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [14] 段玉杰,肖尚斌,黎国有. 我国农业面源污染现状及改善对策[J]. 环境保护与循环经济,2010,30(3):19-21.