

新疆植被覆盖度趋势演变实验性分析

何宝忠^{1,2}, 丁建丽^{1,2}, 张 喆^{1,2}, 阿布都瓦斯提·吾拉木³

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 3. 圣路易斯大学可持续性研究中心, 圣路易斯 MO 63108)

摘要: 基于MODIS-NDVI数据, 提取新疆2005-2015年植被覆盖度(FVC)。通过依据海拔和植被覆盖度的指标划分出山地、绿洲、平原、荒漠等11个子系统。通过斜率、变异系数、线性回归模型等方法来对全疆和不同生态分区的现状和未来发展趋势进行分析, 并用BP人工神经网络来预测新疆2016-2020年的植被覆盖度的时空变化和分析2005-2020年时空动态变化趋势。主要结论为: ① 新疆植被覆盖度总体为上升趋势, 从西北向东南逐渐下降; 山地呈逐年上升趋势, 荒漠呈不显著退化趋势。植被覆盖度的变化主要是由降水量的变化引起; ② 在整个新疆的荒漠和绿洲边缘构成了一个“绿洲—荒漠改善过渡带”, 绿洲呈明显的改善趋势; ③ 2009年是研究期内多数分区植被覆盖度的历史最低点; ④ 在山脉的冰川积雪、湖泊周围的变异性很大, 范围在150%~316%之间, 这主要是由于气候变化、冰川消融和湖泊水位的波动变化所致; ⑤ 北疆生态明显好于东疆与南疆, 其绿洲区域呈现明显的改善趋势。伊犁地区的植被覆盖度相比于其他3个分区的变幅很大, 山地区域呈明显的逐年退化趋势。伊犁地区植被覆盖度的局部最低点是在2008年, 比其他分区的2009年提前了一年, 相应的存在“实时”(伊犁)和“滞后”(东疆、南疆和北疆)的效应, 主要是由于降水量和气温的变化所致。

关键词: 植被覆盖度; MODIS; BP-ANN; 气候变化; 新疆

DOI: 10.11821/dlxb201611007

植被在全球能量交换、生物地球化学和水文循环方面作为研究全球变化的“指示器”上起着重要的作用^[1-3]。植被覆盖度是指植被在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比^[4]。它是描述地表植被, 作为地表植物群落定量指标和描述生态系统的基础数据等的重要参数, 在研究区域生态系统方面起着特别重要的作用^[3-5], 也是蒸散蒸发、光合作用、陆面过程的控制因子^[6-8]。植被覆盖度与区域的干旱条件和程度密切相关, 大部分地区植被覆盖度与干旱程度呈正相关变化, 而相关关系与地表植被覆盖类型有很大的联系^[9]。研究植被覆盖度的主要方法包括两方面: 一是地面调查法, 包括逐点调查法^[10-11]、摄影测量法、野外光谱分析法等^[12]; 二是遥感监测法, 包括经验模型(如NDVI, SAVI, MSAVI)^[13-14]、光谱混合分析法(SMA)、像元二分模型、决策树^[15]、分类树^[16]、人工神经网络^[17]、混合像元分解、像元分解密度模型法和光谱梯度差法^[18]、代数运算、主成分

收稿日期: 2016-05-21; 修订日期: 2016-09-09

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点实验室课题(2016D03001); 新疆大尺度土壤盐渍化监测与预警网络系统平台研发(201591101); 国家自然科学基金项目(U1303381, 41261090, 41161063); 教育部促进与美大地区科研合作与高层次人才培养项目 [Foundation: Key Laboratory of Subject of the Xinjiang Uygur Autonomous Region, No.2016D03001; The Research and Development of the Network Platform for the Monitoring and Early Warning of the Large Scale Soil Salinization in Xinjiang, No.201591101; National Natural Science Foundation of China, No.U1303381, No.41261090, No.41161063; The Ministry of Education to Promote Cooperation with the Mei Da Area of Scientific Research and High-Level Personnel Training Project]

作者简介: 何宝忠(1989-), 男, 重庆人, 博士生, 从事盐渍化监测与提取植被物候信息研究。E-mail: hzb108@163.com

通讯作者: 丁建丽(1974-), 男, 教授, 博导, 从事区域土地盐渍化评估及其可持续发展研究。E-mail: Ding_jl@163.com

分析、傅里叶变换、小波变换等^[19]。像元二分法模型是研究植被覆盖度比较成熟的方法之一,并广泛应用于实际的植被覆盖度遥感监测中^[20]。植被覆盖度对陆地退化和对于旱半干旱区域的陆地荒漠化极为敏感,被认为是评价土地荒漠化最有效的指标^[21],准确获取干旱地区植被覆盖度对于土地资源的合理利用和土地荒漠化的准确评价具有重要意义^[22]。

新疆为典型的山地—绿洲—荒漠系统(mountain oasis desert system, MODS)^[23]。相关学者已经针对新疆不同分区进行了研究,因为不同的研究区有着自身独特的气候特点、生态特征、行政区界限等特点。师庆东等^[24]以NOAA影像的NDVI为数据源,根据植被区域特点,将研究区的植被区域划分为4个区,根据各个区域植被特点,采用不同分类标准,结果表明该类方法可以大大提高NDVI指数的植被分类精度;王智等^[23]把新疆划分为东疆、南疆、北疆、伊犁等4大地区的地带性、绿洲、荒漠等子系统,根据不同地区特点,探讨了不同地区的植被覆盖度变化情况;邵霜霜等^[25]利用Sen+Mann-Kendall趋势分析和空间自相关分析方法,研究新疆植被覆盖的变化趋势;戴声佩等^[26]发现新疆塔里木盆地、吐鲁番、塔河、托里等地区植被退化;张飞等^[27]利用像元二分模型对新疆的植被覆盖度进行了研究;王智等^[28]研究了中国西北干旱区植被覆盖变化Markov过程,结果表明植被覆盖变化受随机过程的控制和长期稳定的驱动因子影响;还有一些学者在新疆不同地区对荒漠植被覆盖度进行了研究^[29-32]。但已有研究主要运用1982-2006年的GIMMS/NDVI的数据,其分辨率只有8 km,因此不能很好地揭示细节上的演变。虽然也有较高分辨率的SPOT/VGT、MODIS1B、TM等数据^[4, 25, 27],但是其研究的地点只是新疆某一个地点或只是某个特定的时期,大多数不超过2012年,并没有突出长时间序列变化和近期及未来演变的特点,而长时序(>10a)植被监测和评价是研究植被生长和受影响特征的核心区域,也是研究陆地生态系统过程和全球变化的重要环节^[19]。而且,现有针对新疆植被覆盖度的研究,大多只在一定的时间序列中做定量的分析,对其未来植被覆盖变化的研究较少。因此,结合前人的研究,本文运用新疆2005-2015年500 m分辨率的MOA13A1-NDVI数据对新疆植被覆盖度变化做定量分析,揭示新疆近11年植被覆盖度变化趋势,然后用BP神经网络模型来对新疆未来植被覆盖度的变化做预测预警的研究,同时对比用NDVI回归分析法预测的精度。

1 研究区域

新疆位于中国西北部,其“三山夹两盆”的地域结构使得植被具有明显的纬向水平地带性分布规律,近30年来,由于气候变化和人类活动的影响,不同区域的植被均发生了相应变化,定量地分析其变化状况有着重要意义^[33]。结合师庆东等^[24]关于影像中的植被分区的方法,同时参考王智等^[28]、邵霜霜等^[25]的研究,在计算历年植被覆盖度数据后,把新疆分为东疆、南疆、北疆及伊犁地区,每个分区又分为山地、绿洲、荒漠和平原,其中伊犁只有山地和平原。基于此,将新疆共划分为2005-2015年11年4个分区在内的共11个子区,考虑所占篇幅,因此只列出2005年与2015年的分区结果(图1)。

2 数据与处理方法

2.1 数据来源与预处理

从美国国家航空航天局NASA的EOS/MODIS数据网(ladsweb.nascom.nasa.gov)下载,内容为栅格归一化植被指数和增强型植被指数(NDVI/EVI),MOD13A1,周期为

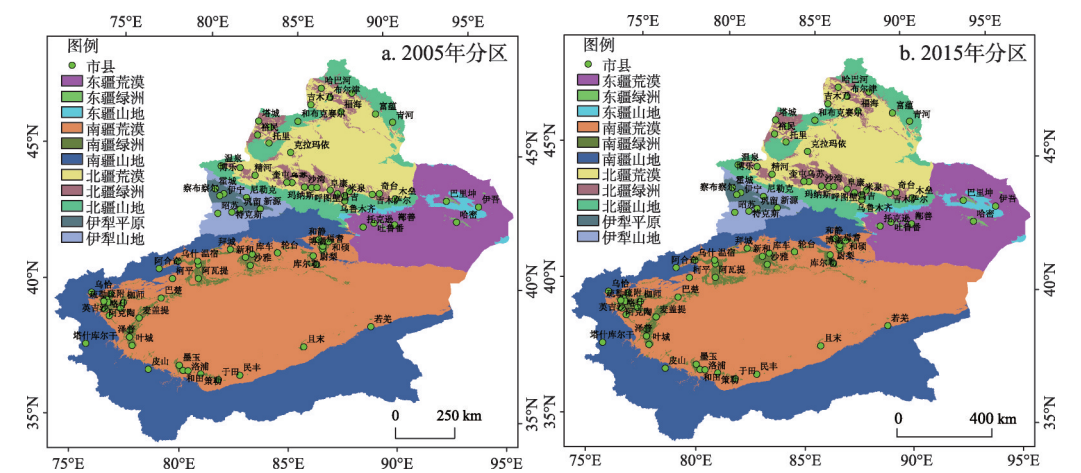


图1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch of different sub-regions in the study area

16天，将全年划分为23个时段的500 m分辨率的3级正弦投影产品^[34]。由于最大值合成法MVC的处理可以减少大气的云、颗粒、阴影、视角以及太阳高度角的影响^[35]，因此本文通过最大值合成法得到研究区每年NDVI最大值序列数据。利用像元二分法得到研究区2005-2015年的植被覆盖度分布图。

2.2 研究方法

2.2.1 植被覆盖度遥感估算模型 在ArcGIS中利用像元二分模型计算植被覆盖度：

$$fvc = \frac{NDVI - NDVI_{SOIL}}{NDVI_{VEG} - NDVI_{SOIL}} \tag{1}$$

式中： $NDVI_{VEG}$ 为全植被覆盖覆盖像元的NDVI值； $NDVI_{SOIL}$ 为无植被覆盖的裸土像元的NDVI值^[20]。

由于受大气影像和地表湿度条件的改变，以及粗超度、土壤类型等条件的不同， $NDVI_{SOIL}$ 也会随之发生变化。同时 $NDVI_{VEG}$ 值也会随着植被类型和植被的时空分布而变化，所以不能采用固定的 $NDVI_{SOIL}$ 和 $NDVI_{VEG}$ 值^[36-37]。因此根据冯莉莉等^[20]、何慧娟^[38]、张喜旺等^[39]的研究，并结合本研究区的实际情况进行以下的操作，首先获取新疆2005-2009年MODIS 500 m分辨率的土地利用产品MCD12Q1的土地利用数据，从中国科学院资源环境科学数据中心（<http://www.resdc.cn>）下载2010年土地利用数据。由于中国科学院的土地利用数据分辨率是1000 m，因此2011-2015年使用的是2009年分辨率较高的土地利用数据。根据MCD12Q1和中国科学院土地利用数据划分的标准，共分为草地、常绿阔叶林、常绿针叶林、城市和建筑区、稀疏草原、稀疏植被、雪和冰、永久草地等17种地类；在计算时按照获得的土地利用数据把研究区的水体和冰雪区域去除。基于土地利用图针对每个单元计算NDVI数据的频率累积图；根据频率统计表，土地利用单元内取累积频率为1%的NDVI值为 $NDVI_{SOIL}$ ，土地利用单元内取累积频率为99.9%的NDVI值作为 $NDVI_{VEG}$ 。但是针对稀疏植被，发现如果仅仅利用1%的累积频率、5%~95%或2%~98%的置信区间，对于反演稀疏植被覆盖区的结果的误差是极大的，并且对其准确的遥感估算一直是遥感应用领域的难题之一^[22]，因此通过反复调参并对比前人的研究结果和野外实地调查，分别取无水体和积雪区NDVI的最大和最小值作为 $NDVI_{VEG}$ 、 $NDVI_{SOIL}$ 。这主要是因为稀疏植被面积广泛，且大部分位于荒漠之中，其真实覆盖度能达到1左右的像元不足1%所致。由于涉及到不同地类，不同分区，数据量与计算量较大，因此所有过程均

用python语言在ArcGIS环境中编程建模完成。

2.2.2 平均值变异系数 通过研究区历年不同分区的植被覆盖度变化情况，分析新疆整体的变化趋势。通过计算历年不同子区的标准偏差（SD）及其变异系数（CV）来描述其变幅与变异性^[23, 40]。标准差SD和变异系数CV计算公式为：

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (fvc_i - \overline{fvc})^2}{n-1}} \quad (2)$$

$$CV = SD / \overline{fvc} \times 100 \quad (3)$$

式中： fvc_i 为第*i*年的*fvc*实际观测值； \overline{fvc} 为11年*fvc*平均值。

2.2.3 植被覆盖度年际变化趋势计算 一元线性回归分析可以以每个像元为单元，计算出2005-2015年的NDVI的变化趋势^[5]：

$$slope = \frac{\left[n \sum_{j=1}^n j \times y_j - \left(\sum_{j=1}^n j \right) \left(\sum_{j=1}^n y_j \right) \right]}{\left[n \times \sum_{j=1}^n j^2 - \left(\sum_{j=1}^n j \right)^2 \right]} \quad (4)$$

式中： n 为监测年数； y_j 是第*j*年的植被覆盖度； $slope$ 为多年植被覆盖度线性拟合概率。拟合直线可以反映新疆2005-2015年植被覆盖度的变化趋势及变化幅度，斜率为正，表明植被覆盖度增加，反之减少^[20]。

2.2.4 线性回归分析 回归分析法提供了一种有效的估算植被覆盖度的解决方案^[8]。回归分析是考察多个变量之间统计联系的一种重要方法，是研究植被长时序变化趋势的重要方法^[19]。它是以时间*t*为自变量，对多年植被指数影像中各像素点NDVI值进行一元回归分析，其特点是以单个像素的时间变化规律反映整体的空间变化规律^[40]。因此本文探讨利用2005-2014年10年的数据来预测2015年植被覆盖度，并与用像元二分法反演得到的2015植被覆盖度的结果做对比。

2.2.5 BP-ANN模型的预测研究 前人的研究多数只是用人工神经网络来结合其他模型对城市的演化和复杂土地利用系统进行了模拟研究^[41-43]，以及用在旱情监测和生态环境压力等研究方面^[44-45]。但是这些研究多数只是模拟已知年的数据，然后做精度分析，并没有预测未来的实际变化。国外一些学者运用人工神经网络来研究对于植被覆盖度、FAPAR和LAI的反演^[46-48]。这些研究经过基于BELMANIP点的验证后表明均方根误差RMSE都小于0.09，精度较高，并且发布了GEOV1、CYCLOPES等产品。但国外这些研究只是预测某期影像的时空分布，并没有预测未来的变化。结合前人的研究，本文采用3层BP神经网络，来实际预测研究区未来植被覆盖度的发展变化（图2）。

神经网络是一种黑箱结构，多层神经

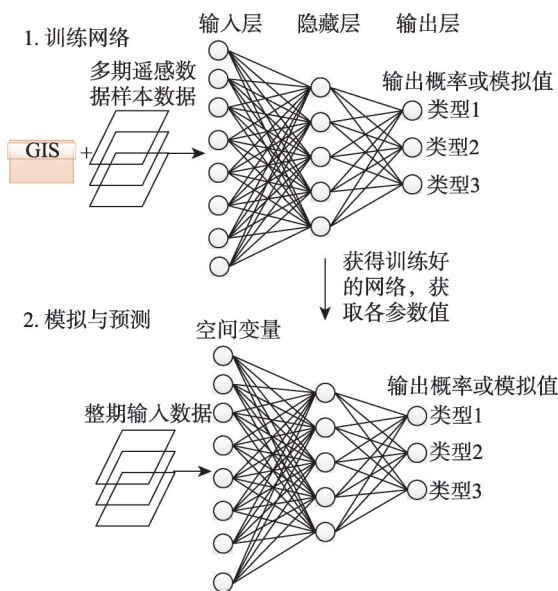


图2 基于神经网络的预测植被覆盖度变化

Fig. 2 Prediction on FVC change based on BP-ANN model

网络能以任意精度逼近给定样本的分布和结构。训练过程无需人工操作,并且自动获得每个神经元的权重^[43]。它具有运算效率高、自学习能力强、适应面宽等优点^[45]。利用BP神经网络主要分为模型校正和模拟,主要思路为:建立三层神经网络,包括输入层,隐藏层和输出层,利用随机采样的数据对其进行训练,在利用训练好的网络对整个研究区数据进行模拟与预测(图2)。

输入层将信号输出到隐藏层,隐藏层第 j 个神经元所收到的信号为^[41, 43]:

$$net_j(k, t) = \sum w_{ij} x'_i(k, t) \quad (5)$$

式中: k 为输出信号对应的模拟单元; t 为模拟时间; $net_j(k, t)$ 为隐藏层第 j 个神经元所接收到的信号; w_{ij} 为连接输入层和隐藏层之间的参数,即权重值。

$$\text{隐藏层对该函数的响应为: } \text{sigmod}_j(k, t) = \frac{1}{1 + e^{-net_j(k, t)}} \quad (6)$$

$$\text{所以输出层第 } l \text{ 个神经元所接收到的信号为: } PV_l(k, t) = \sum_j w_{jl} \text{sigmod}_j(k, t) \quad (7)$$

式中: $PV(k, t)$ 为单元 k 在模拟时间 t 时刻第 l 个神经元所接收到的信号; w_{jl} 为隐藏层和输出层之间的参数,即权重值。

将每10年的植被覆盖度作为输入层数据,输出层为预测年的输出数据,由于隐藏层的神经元的数目至少为 $2n/3$ 个^[49](其中 n 为输入层神经元的数目),因此本文中隐藏层的神经元数目为7个。具体过程如下:

(1) 采样:在ArcGIS中利用数据管理工具中的创建随机点功能,设置采样距离为20 km,最后生成了3602个采样点,其中3102个样点作为训练样本,500个样点作为测试样本。这些样点均匀分布在不同的地类、气候区、地形地貌等特征的分区当中,因此其样点代表了不同分区所独具的气候、地貌等特点使得具有代表性和预测的无偏性^[47]。由于需要采集连续时间列的数据,所以2005-2014年之间都是这些采样点,每个样点所记录的是2005-2014年同一个像元中10年间的值。训练样本主要用来训练神经网络,使得输入层、隐藏层和输出层各层之间的节点之间最终能得到一个最优的权值分配矩阵^[50],训练结束后就可以对输入的数据进行自动预测输出层神经元的植被覆盖度数据。

(2) 预测2015年植被覆盖度:利用Matlab创建BP神经网络,利用(1)中训练样本和测试样本的数据来训练网络。经过反复调试设置迭代次数为1500次,学习速率为0.10,梯度下降法采用Levenberg-Marquardt算法,因为这种算法是可以调节不同层之间权重的最优化方法^[46]。利用训练好的网络来对测试数据进行预测,并根据测试样本做精度验证。然后用训练好的网络预测2015年植被覆盖度,并与线性预测方法的结果进行对比。

(3) 预测2016-2020年植被覆盖度:用(1)同样的点来采集2006-2015年的训练样本与测试样本,依照(2)中的设置训练神经网络,然后预测新疆2016年的植被覆盖度,再训练2007-2016年间的的历史数据后,预测出2017年的植被覆盖度数据,依此类推,最终得到2016-2020年的植被覆盖度数据。

3 结果与讨论

3.1 新疆植被覆盖度的时空变化特征

根据公式(1)反演得到2005-2015年新疆的植被覆盖分布图(图3)。经过之前对新疆典型的渭干河—库车河三角洲绿洲进行野外实际采样后得出用像元二分法的总体精度可达83.52%^[27]。同时在新疆石河子地区用这种方法的决系数(R^2)达到0.86,均方根误差(RMSE)为0.10^[3]。这两个地区都包含了典型的山地—绿洲—荒漠系统,因此用像

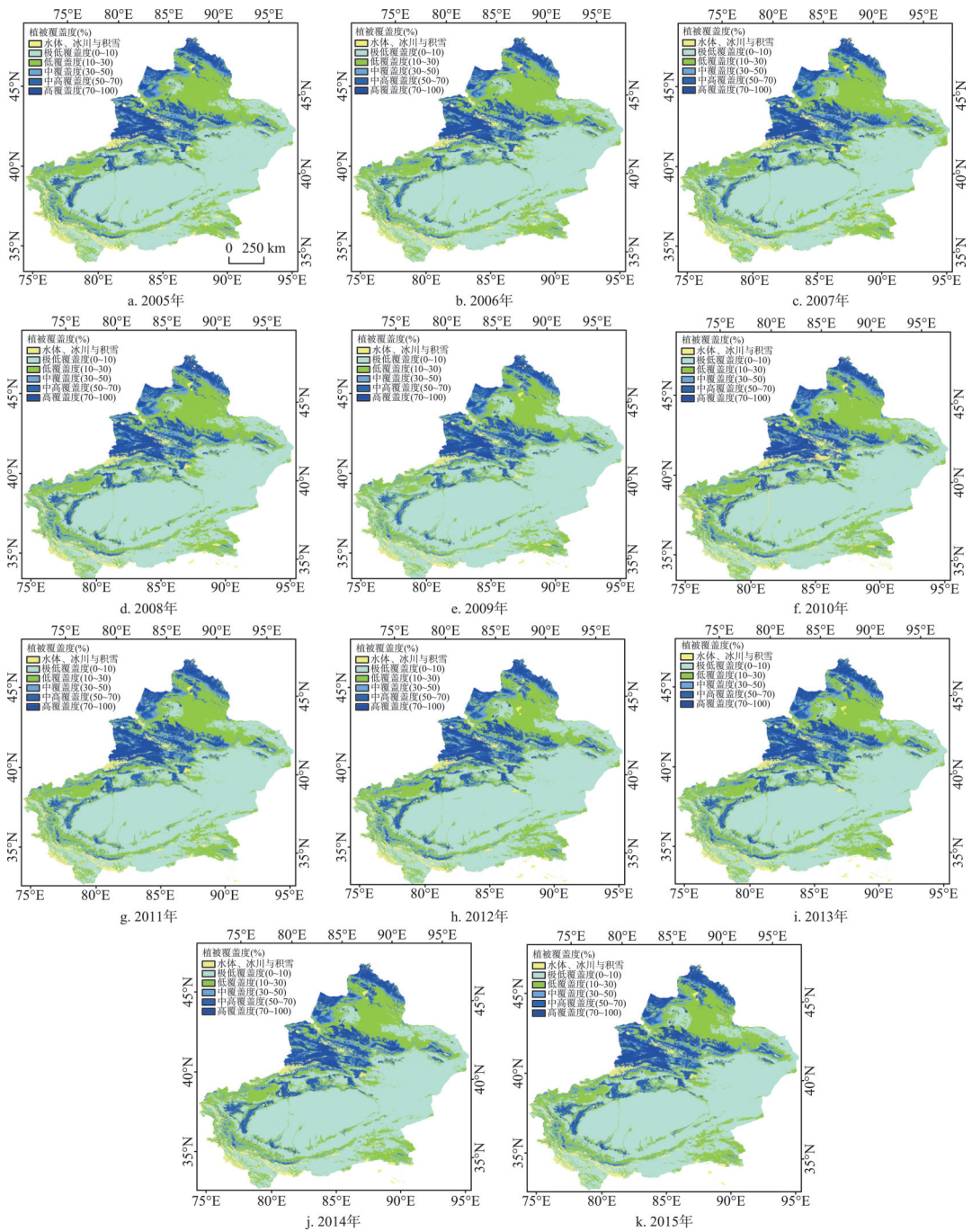


图3 2005-2015年新疆植被覆盖度监测结果

Fig. 3 Monitoring results of fractional vegetation cover in Xinjiang from 2005 to 2015

元二分法来反演新疆植被覆盖度精度较高。

新疆山地—绿洲—荒漠系统植被覆盖变化既有不同子系统之间的差异，又有分区特征^[23]。各个绿洲、伊犁地区为高植被覆盖区（图3）。荒漠、绿洲、山地大体呈现出波动性的增加与减少。全疆总体趋势为不显著的上升趋势（ $P = 0.105$ ），从西北向东南植被覆盖度逐渐下降（图4），这主要是受来自北冰洋水汽环流和高山冰雪融水的影响^[51]。山地

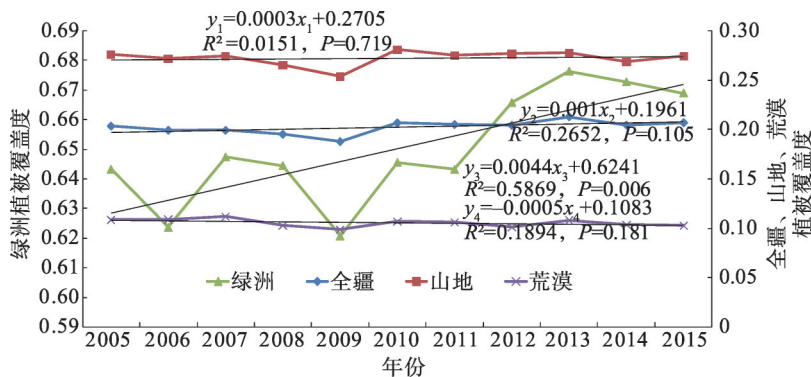


图4 2005-2015年新疆地区植被覆盖度变化趋势

Fig. 4 The changing trend of fractional vegetation cover for the whole Xinjiang region from 2005 to 2015

呈现出显著的上升趋势, 覆盖度维持在0.30左右, 总体平稳。荒漠呈现出显著的下降趋势, 多年均值维持在0.10左右, 总体也较平稳。但是, 新疆的绿洲呈现出极显著的上升趋势 ($P = 0.006$), 多年均值在0.62以上。总体上看, 2009年是明显的转折期, 其植被覆盖度是研究期的历史最低点, 在全疆、山地、绿洲、荒漠来看都是历史最低值, 然后从2010年开始有一个逐步的回升过程, 总体趋势都相对平稳, 这与相关学者的研究是匹配的^[25]。

总体上东疆、南疆、北疆地区均呈现出绿洲覆盖度均值最高(图5), 山地和荒漠次之。但北疆与东疆、南疆相比有着显著的不同。山地方面: 北疆的植被覆盖度在0.50~0.54之间, 东疆在0.29~0.39之间, 南疆在0.15~0.18之间, 因此山地覆盖度从高到低排列为北疆>东疆>南疆, 这与北疆有着丰富的降水和独特的气候条件有着密切的联系。杨光华等^[52]研究发现年降水量的变化是导致新疆植被覆盖度变化的主导因素, 降水量的下降植被覆盖也会减少。从总体趋势看, 新疆全年水汽增加最明显的是新疆北部和西南部^[53], 同时新疆水资源北部多于南部, 西部多于东部^[54]。在荒漠方面: 东疆与南疆有着相似之处, 其多年植被覆盖度均值维持在0.1左右。但在北疆达到了0.2左右, 这与北疆中高覆盖度荒漠区占较大比例密切相关^[55]。但是在东疆、南疆、北疆其荒漠的年均植被覆盖度都呈现出显著的逐年下降趋势, 说明在生态环境本身就差的系统内, 其生态环境可能只能变得更糟, 而很难变得更好。在绿洲方面, 东疆0.62~0.65, 南疆0.60~0.66, 北疆

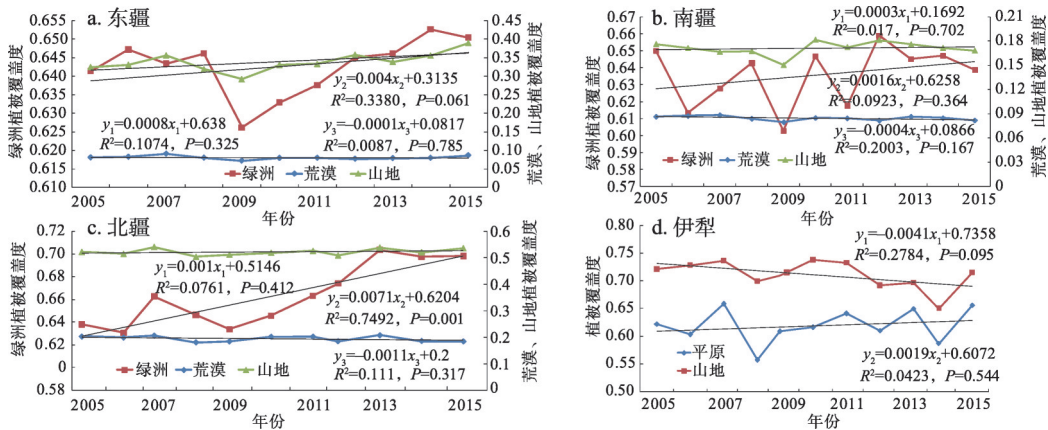


图5 2005-2015年新疆不同分区植被覆盖度变化趋势

Fig. 5 Changing trends of fractional vegetation cover for different sub-regions in Xinjiang from 2005 to 2015

0.63~0.70, 因此这3个地区基本一致, 但北疆明显略高, 其呈现极显著逐年升高趋势($P = 0.001$)。在伊犁地区, 由于其独特的气候条件, 植被覆盖度一直处于高位。可以得出, 伊犁与东疆、南疆和北疆有着显著的不同, 其山地的多年均值植被覆盖度要高于平原区, 这与其他3个分区是相反的。可能是因为伊犁的山区有着极为茂盛的云岭雪衫和高覆盖度的林草地^[56]。山地植被覆盖度在0.65~0.74之间, 平原的植被覆盖度在0.55~0.66之间, 山地和平原的植被覆盖度差异明显。但是无论是从新疆总体还是从东疆、北疆、南疆分区来看, 除北疆地区的山地和荒漠区的历史最低值在2008年外, 其他分区的历史时期植被覆盖度的最低点都在2009年。伊犁地区的山地和平原历史的局部最低点出现在2008年, 山地区域在2012与2014年为最小值, 但位于2008年周围的年份值都比2008年的值大(图5)。因此以2008年作为参考年, 则相应的存在“实时”(指伊犁地区)和“滞后”(指东疆、南疆与北疆地区)的效应。伊犁地区在2009-2011年呈显著的上升过程, 2011-2014年呈显著的下降过程, 但是2014-2015年又处于上升趋势, 这几个过程明显的与东疆、南疆和北疆的趋势不同, 因此说明伊犁地区总体上植被覆盖度变化波动较为剧烈, 山地与平原的最高与最低值之差分别为0.09和0.10, 而东疆、北疆和南疆在山地、绿洲、荒漠系统中的最大与最小值之差都没有超过0.07(除东疆的山地系统外, 最大与最小值之差为0.098)。为了更好的显示新疆植被覆盖度是否随气候因素变化, 研究了降水量、气温与植被覆盖度的历年变化趋势(图6, 图7)。

2005-2013年7月伊犁地区山地和平原植被覆盖度与降水量和气温的趋势变化图是伊宁和昭苏两个测点的年平均值(图6), 气象数据源于中国气象局国家气象信息中心^[57]。新疆地区植被覆盖度与降水和气温的历年趋势变化图(图7)是新疆除伊宁和昭苏外共52个测点的年平均值。伊犁地区的植被覆盖度与年平均降水量的变化趋势基本一致(图6), 随着降水量的波动变化而出现波动变化, 不同分区的植被覆盖度在2008年都为历史

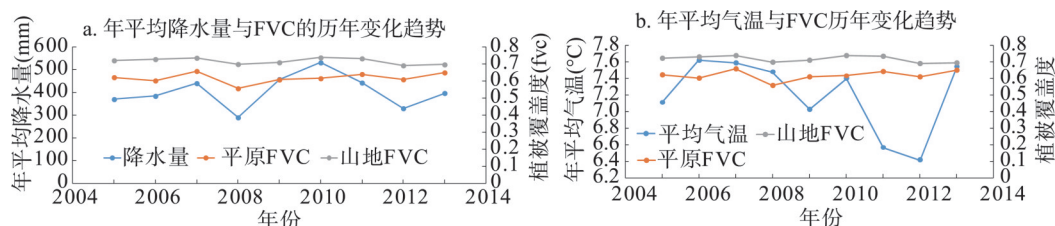


图6 2005-2013年伊犁地区降水量、气温与植被覆盖度的历年变化趋势

Fig. 6 Changing trends of annual mean temperature and annual precipitation with fractional vegetation cover in Yili from 2005 to 2013

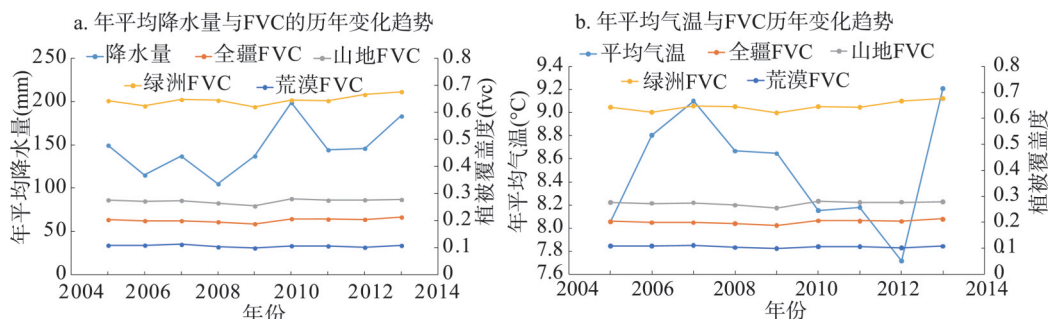


图7 2005-2013年新疆地区降水量、气温与植被覆盖度的历年变化趋势

Fig. 7 Changing trends of annual mean temperature and annual precipitation with fractional vegetation cover in Xinjiang from 2005 to 2013

最低值。但是与平均气温的变化趋势相比并没有呈现出一致的变化特征。新疆不同分区的植被覆盖度与气候因素的响应(图7)与图6基本相同,但降水量在2008年为最低值而不同分区植被覆盖度的最低值出现在2009年,仍然存在“实时”与“滞后”的效应。原因可能是由于气温的影响,伊犁地区气温在2008-2009年间较低且呈下降趋势,所以植被迅速对温度的变化产生了响应,植被长势实时凸显了出来。新疆其他地区在2008-2009年气温较高且呈不变的趋势,植被对温度的变化响应较慢,故长势的凸显出现了延迟。因此,据以上分析讨论得出新疆在近10年中的生态系统受到一系气候因素的影响,特别是降水量的变化,使得植被覆盖度波动变化明显。

3.2 植被覆盖度斜率变化趋势

新疆各分区都不同程度存在着或正或负的变化趋势(图8),图像绝对值的大小代表近11年间植被覆盖度的变化程度^[20],正值表示这11年间植被覆盖度呈增加趋势,负值表示这11年间植被覆盖度呈较少趋势。显著增改善的地区都位于绿洲的外围(图8),主要是分布在天山南麓与北麓、沿塔克拉玛干沙漠绿洲的边缘(如渭库绿洲、阿克苏绿洲)、玛纳斯河流域中的绿洲外围、塔城绿洲边缘等。在各绿洲的外围和荒漠之间存在一个轻微改善的区域,主要位于昆仑山北麓外围—阿尔金山北麓至塔克拉玛干沙漠之间、阿克苏地区绿洲至塔克拉玛干沙漠、吐鲁番地区至塔克拉玛干沙漠、吐鲁番地区至准格尔盆地、哈密地区至准格尔盆地、塔城地区至准格尔盆地、阿勒泰地区至准格尔盆地之间等均有改善,改善的程度在0~0.028之间,因此构成了一个“绿洲—荒漠改善过渡带”。但东疆、北疆、南疆的荒漠地区基本呈现的是轻微退化的状态,但退化幅度微弱,幅度在-0.003~0之间,因此可以说明在新疆荒漠区的植被覆盖度总体趋势稳定。但北疆的准格尔盆地、托里、和布克赛尔、吉木乃等周边地区退化现象明显。伊犁山地地区退化现象极为明显。南疆沿着昆仑山北麓边缘退化现象明显,南疆山地的西北部退化严重以及墨玉、和田、洛浦、策勒、疏勒、疏附、喀什等县域周边退化现象明显。以上所有新疆植被呈现退化的区域都是历年植被覆盖度较高的区域,也是冰川积雪发育的山脉

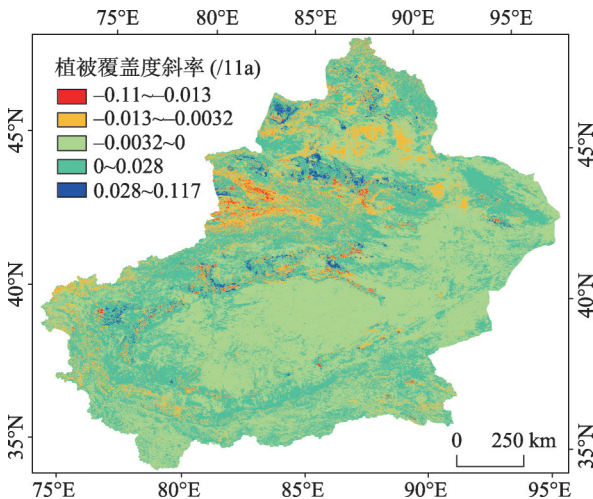


图8 2005-2015年新疆植被覆盖度斜率分布
Fig. 8 Slope map of fractional vegetation cover in Xinjiang from 2005 to 2015

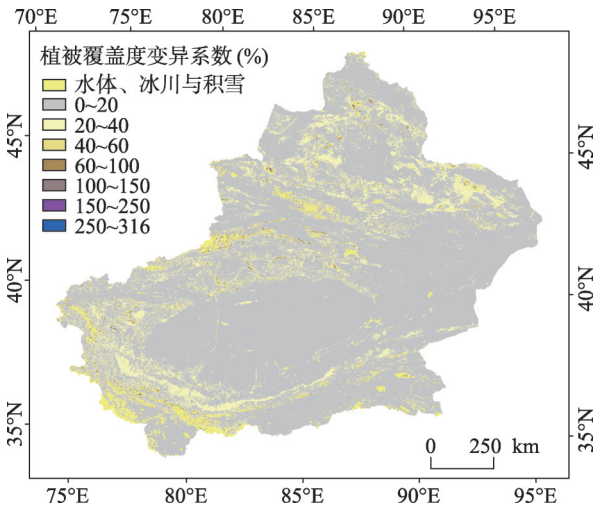


图9 2005-2015新疆植被覆盖度变异系数空间分布
Fig. 9 Distribution of fractional vegetation cover change in Xinjiang from 2005 to 2015

边缘和人类居住的核心区域,其植被覆盖度的降低主要是受全球气候变化和人类扰动影响而引起的^[58-61]。

3.3 植被覆盖度变化幅度及变异性

总体上新疆西北部—西南部的变异性要大于东南部(图9)。植被覆盖度极低的荒漠地区、南疆昆仑山—阿尔金山非冰川积雪覆盖的地区的变异性都很小,不到20%。高植被覆盖的各绿洲外围和沿着昆仑山北麓边缘有较小的变异系数,在20%~40%之间。

在昆仑山—阿尔金山、伊犁地区山脉的冰川积雪较远边缘呈现出中等的变异性,变异系数在40%~150%之间。在昆仑山—阿尔金山冰川积雪较近边缘、新疆各湖泊周围(如艾比湖、博斯腾湖、阿牙克库湖等)等有较大的变异性,范围在150%~316%之间。这与新疆气候总体正在向暖湿方向变化^[53]、近50年来气温呈上升趋势^[62]和近50年来降水量呈增加趋势^[63]、新疆的冰川在近10年中出现了加速消减的趋势^[53]、冻土融化使得释放出冻土的碳加速气候变暖^[64]等有着极大的关系,这些因素对植被覆盖度和土地覆被的变化有极大的影响^[53]。同时也因为灌溉面积的增大引发了土地沙化、土壤次生盐渍化、河道断流、湖泊萎缩等环境问题,严重威胁着生态安全^[54]。这些环境问题改变了地表覆盖类型,使得以往的水域变为干涸的河床、耕地成为弃耕地、冰川退去留下裸露的岩石地、降水增多使部分原低植被覆盖区变为高覆盖植被区等变化影响了植被覆盖度的变化。比如在博斯腾湖附近,其附近有60%~150%的变异性。阿吉吉丽等^[58]对博斯腾湖进行研究,发现近30多年来博斯腾湖小湖水域面积呈波动性变化趋势,总体上呈现萎缩的趋势,景观破碎化程度有加深的趋势。并且博斯腾湖受人类活动影响大,2002年后水位下降,总体上呈现萎缩的趋势^[59]。随着气候变暖,冰川退缩加剧,融水量增大,冰川洪水灾害随着冰川融水径流的增加而增多^[60]。这些灾害对山脉的生态造成影响,进而影响植被覆盖度的变化。李成秀等^[61]研究了近40年来西昆仑山冰川及冰湖变化与气候的影响,表明1976-2010年西昆仑山冰川呈现微弱的退缩;气温缓慢上升是西昆仑冰川退缩的原因之一。这些研究表明,冰川、积雪、湖泊因气候和人为扰动的影响对于生态系统和植被覆盖度的影响巨大,积雪性融水的多少也会对植被覆盖度造成一定的影响,因此在冰川积雪和湖泊周围的变异系数较大。

这个变异系数并不能反映出植被区的改善与退化的情况,比如退化明显的伊犁地区其变异系数居然大部分地区只是0~20%之间(图9),其原因就在于同趋势斜率相比,标准差只能表示变化的幅度而不能体现变化的方向^[40]。

3.4 线性方程和BP-ANN方法来预测2015-2020年植被覆盖度

利用线性方程和神经网络的预测的2015年结果(图10a、10b)。2015年实际的反演结果如图11a所示,并与线性预测方法的结果进行对比。通过测试样本500个点的精度验证后可决系数 R^2 为0.9705,精度较高。为了更好的展现两种方法的精度,从整个研究区中用ArcGIS软件随机选点的功能选取了600个验证点(图11b),通过精度验证(图12,图13),预测出2016-2020年的植被覆盖度(图14)。对预测结果精度验证与讨论如下:

(1) 整体:对比图10和图11a,直观地可以看到两种方法在相应的低中高植被区都与真实的反演结果很接近。对比选择的研究区600个验证点的真实反演值和预测值(图12a、12b),对于中低覆盖度的区域其真实值与两个模型的模拟值都很接近,但在部分高覆盖度的区域,有少部分预测值与真实值相差较大。线性预测结果的可决系数达到0.9459,均方根误差为0.053。BP-ANN预测值的可决系数达到了0.9502,均方根误差为0.050,相关性更好,更能预测未来的演变情况。为了更好的显示BP-ANN模拟的效果更加精确,从600个样点中选择前63个样点进行预测结果细节的展示(图13)。

(2) 局部:从图13中可以得出在很多验证点上真实值与预测值极为接近,但很明显

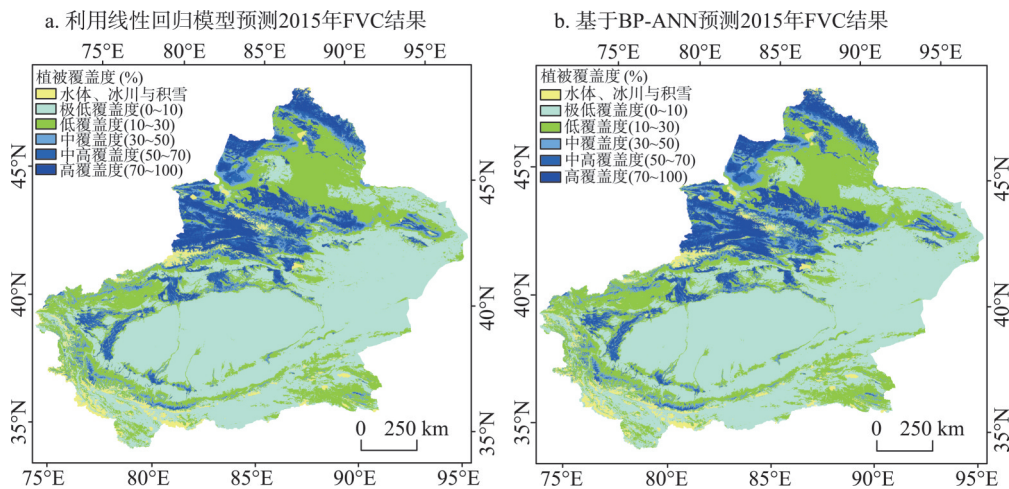


图 10 用线性回归模型和BP-ANN预测新疆2015年植被覆盖度的结果

Fig. 10 The simulation of fractional vegetation cover using NDVI linear regression method and BP-ANN model in 2015

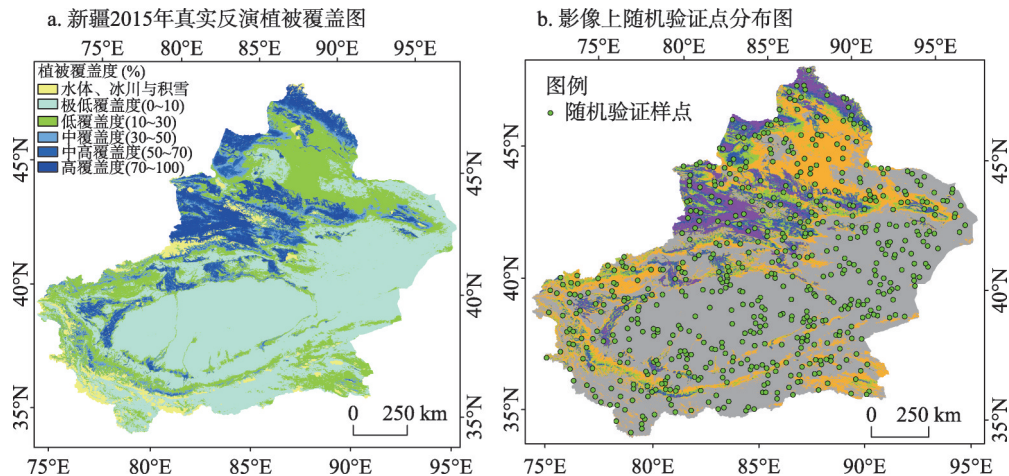


图 11 新疆2015年真实反演植被覆盖度与验证点分布图

Fig. 11 The inversion of fractional vegetation cover and the distribution of valid points in Xinjiang in 2015

BP-ANN在很多点上与其真实值几乎都是相等的，但线性拟合法在多处点上没有实现。

综上，BP-ANN的拟合效果在整体上要明显优于线性拟合模型。新疆低中高植被覆盖度分布的区域并无明显变化（图14，图15），新疆各个绿洲、伊犁、塔城地区、阿勒泰山、昆仑山—阿尔金山部分地区等均有较高的植被覆盖度。荒漠地区的植被覆盖度变化并不大，一直处于极低值的状态。从图15中可以得出对于新疆整个区域与山地出现的是不显著增加趋势，绿洲为不显著下降趋势，荒漠为微弱的显著上升趋势。东疆、南疆和北疆的荒漠区都显示为增加趋势，这可能是随着气候变暖，降雨增多，荒漠区生态环境有所改善所致。在绿洲区都显示为下降趋势。东疆与南疆的山地区域为增加趋势，北疆的山地区域为下降趋势。伊犁的平原为显著下降趋势，山地为不显著下降趋势。

3.5 对预测后结果的整体讨论(2005-2020年)

新疆2005-2020年植被覆盖度呈极显著的改善趋势 ($P = 0.002$)，山地呈不显著的上升趋势，覆盖度维持在0.3左右，总体趋势平稳。荒漠呈不显著上升趋势，多年均值维持在0.1左右。与2005-2015年相比，预测新疆荒漠的总体将呈改善趋势，这主要与气候变

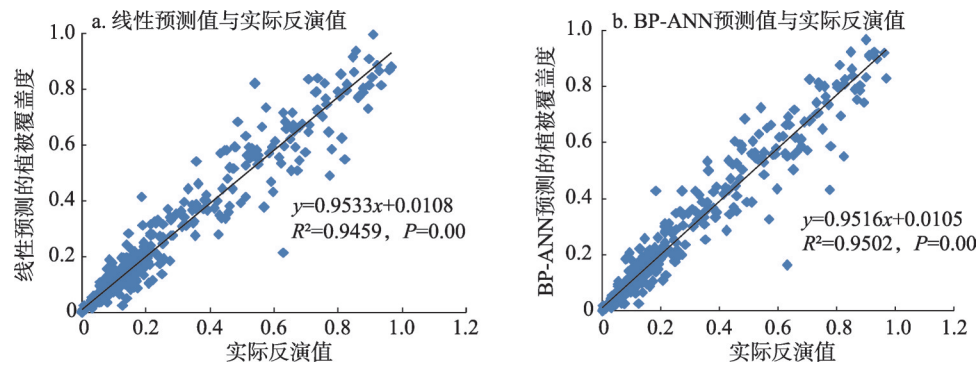


图 12 预测与实际反演的植被覆盖度的回归分析

Fig. 12 The regression analysis of fractional vegetation cover for simulation and inversion results

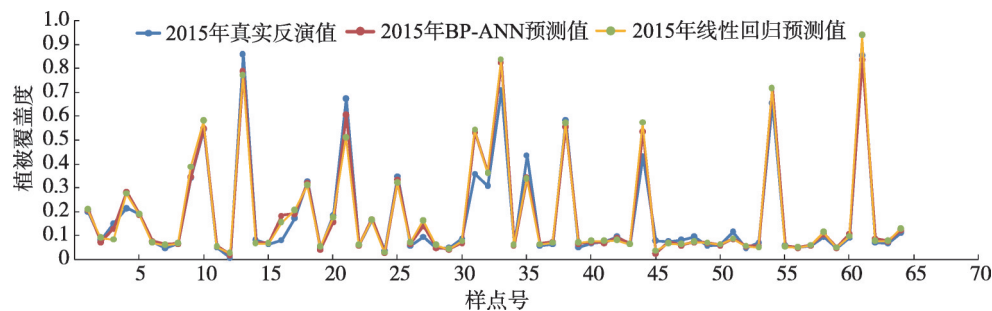


图 13 部分验证点预测与真实的植被覆盖度比较

Fig. 13 Comparison of simulation and inversion results between proportion valid points

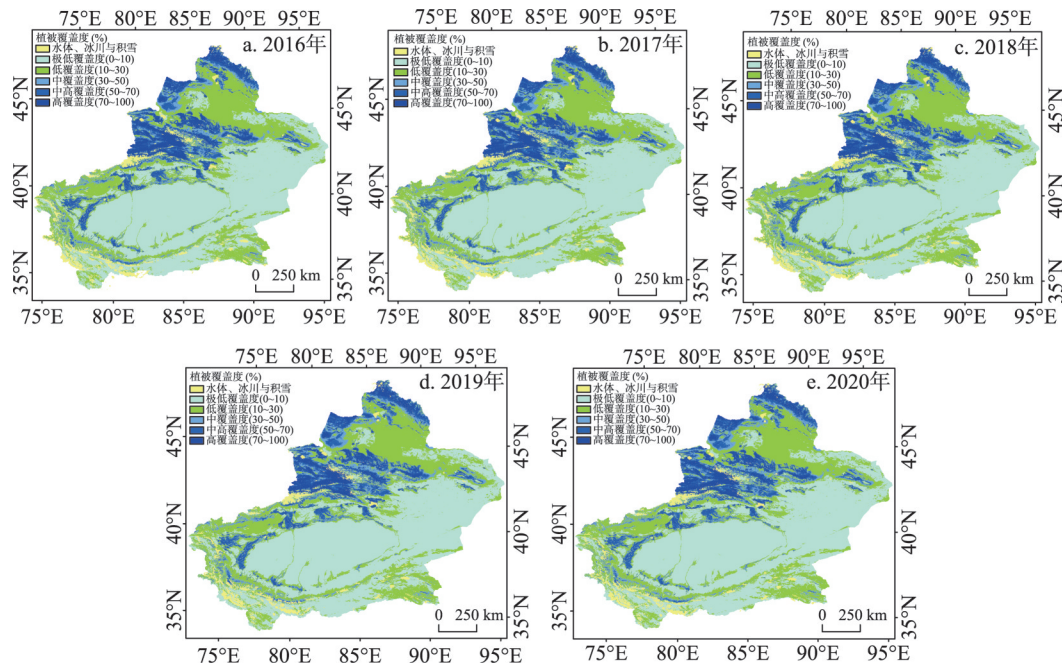


图 14 新疆 BP-ANN 2016-2020 年植被覆盖度模拟结果分布

Fig. 14 The simulation of fractional vegetation cover using BP-ANN model from 2015 to 2020 in Xinjiang

化有关。新疆绿洲呈不显著上升趋势 ($P = 0.119$), 相比于2005-2015年的显著上升趋势, 新疆绿洲受其他因素的影响较大, 多年均值在0.62以上(图4, 图5, 图15, 表1)。

新疆分区: 东疆、南疆、北疆地区均呈现出绿洲覆盖度均值最高, 山地和荒漠次之(图5, 图15, 表1)。其他方面也与前面论述的2005-2015年变化趋势基本一致, 局部不同。① 东疆: 通过预测发现, 绿洲区域在2005-2015年植被覆盖度呈现的是不显著上升趋势, 而在2005-2020年呈不显著下降趋势。荒漠区域在2005-2015年植被覆盖度呈现的是不显著下降趋势, 在2005-2020年总体来看呈现的是不显著上升趋势。② 南疆: 绿洲区域在2005-2015年植被覆盖度呈现的是不显著上升趋势, 而在2005-2020年呈现出显著下降趋势。荒漠区域在2005-2015年植被覆盖度呈现的是不显著下降趋势, 在2005-2020年总体呈不显著上升趋势。③ 北疆: 2005-2015年的荒漠、绿洲、山地变化趋势与2005-2020年的总体变化趋势基本一致。绿洲植被覆盖度呈显著的上升趋势 ($P = 0.003$), 荒漠植被覆盖度呈现不显著的下降趋势, 山地呈现出不显著的上升趋势。④ 伊犁: 2005-2015年的发展趋势与2005-2020年总体发展趋势大体一致, 平原地区植被覆盖度呈现出上升趋势。2016-2020年的变化幅度放缓, 变化不超过0.02, 但这几年之间总体呈下降趋势。山地植被覆盖度也是呈不显著下降趋势, 2016-2020年之间交替上升与下降, 总体趋势是下降的, 这与伊犁地区之前波动变化的趋势一致, 因此证明BP人工神经网络的确具有强大的自学习能力, 能够很好的模拟未来的发展趋势。

4 结论

(1) 新疆植被覆盖度总体呈改善趋势, 从西北向东南逐渐下降。山地呈改善趋势, 荒漠地区呈退化趋势, 绿洲地区呈显著的改善趋势。植被覆盖度主要是受降水量的影响。2009年的植被覆盖度处于历史最低点。在绿洲的外围和荒漠之间存在一个轻微改善的区域, 构成了一个“绿洲—荒漠改善过渡带”。新疆西北部—西南部的变异性要大于东南部, 荒漠区和昆仑山—阿尔金山的非冰川周围地区变异性很小, 而在各山脉的冰川积雪、湖泊周围的变异性很大, 这主要是因气候变化、冰川消融和湖泊水位波动等所致。

从分区看: 北疆生态明显好于东疆与南疆, 其绿洲区域呈现明显的改善。伊犁地区植被覆盖度变幅大, 山地区域明显呈逐年退化。伊犁地区植被覆盖度的局部最低点是在2008年比其他地区的2009年提前了一年。以2008年作为参考年, 相应的存在“实时”(伊犁地区)和“滞后”(东疆、南疆和北疆)的效应, 这主要是降水和气温变化的结果。

(2) 2016-2020年新疆低中高植被覆盖度分布的区域并无明显变化。整个区域与山地呈不显著增加趋势, 绿洲为不显著下降趋势, 荒漠为微弱的显著上升趋势。东疆、南疆和北疆的荒漠区均呈增加趋势, 在绿洲区均呈下降趋势。东疆与南疆的山地区域为增加趋势, 北疆的山地为下降趋势。伊犁的平原呈显著下降趋势, 山地呈不显著下降趋势。

2005-2020年新疆低中高植被覆盖度分布的区域并无明显变化, 总体呈显著的改善趋势 ($P = 0.002$), 山地大体呈现出不显著的上升趋势, 覆盖度维持在0.30左右, 总体趋势平稳。荒漠总体上呈不显著的上升趋势, 多年均值维持在0.10左右, 相比于2005-2015年的不显著下降趋势, 新疆荒漠的总体呈改善趋势, 总体趋势平稳。新疆的绿洲呈不显著的上升趋势 ($P = 0.12$), 相比于2005-2015年的显著上升趋势, 呈现出新疆绿洲整个地区受降水与气温等气候因素的影响较大, 多年均值在0.62以上。

预测之后各分区的发展趋势与2005-2015有较大的不同, 具体表现是: 2005-2020年的东疆、南疆的绿洲和荒漠区域的发展趋势与2005-2015年相反, 分别是变为趋于退化和趋于改善, 因此有必要在这些区域做必要的生态保护措施。北疆区域预测后的发展趋势

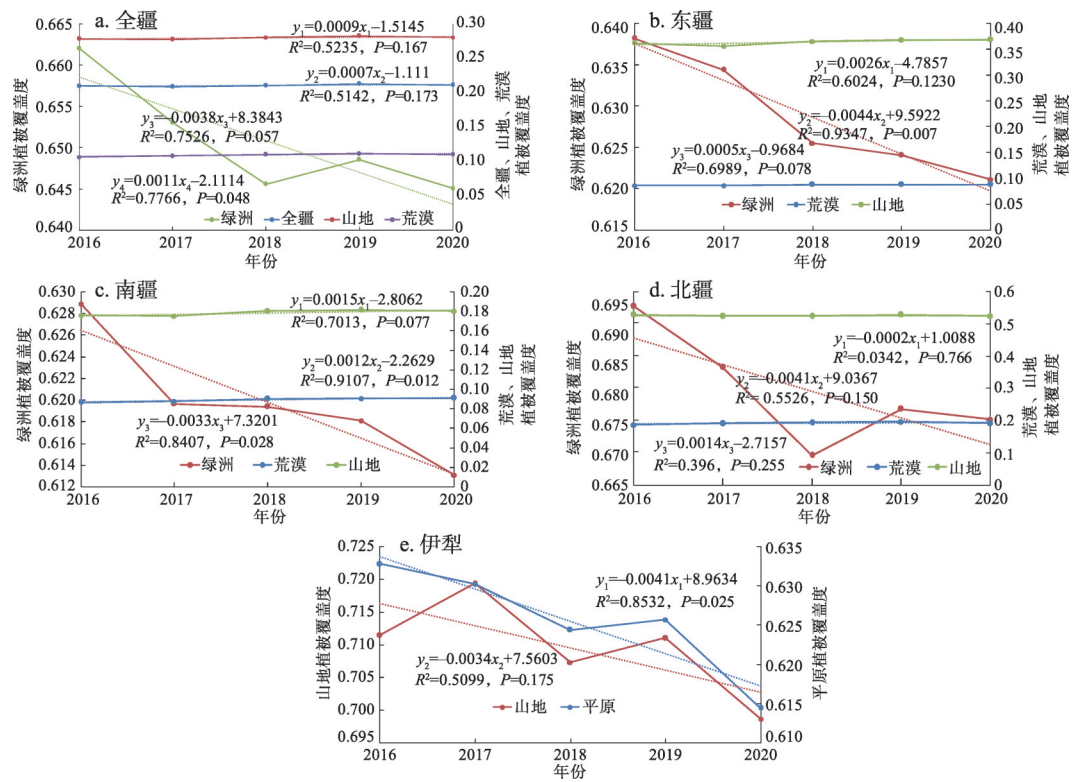


图 15 预测年份 2016-2020 年新疆植被覆盖度变化趋势

Fig. 15 Predicted changing trends of fractional vegetation cover for the whole Xinjiang region from 2016 to 2020

表 1 新疆不同生态区植被覆盖度趋势变化统计表

Tab. 1 Changing trends of fractional vegetation cover for different ecological regions of Xinjiang from 2005 to 2020

| 生态分区 | 2005-2015 年 | 2016-2020 年 | 2005-2020 年 |
|------|-------------|-------------|-------------|
| 新疆 | | | |
| 全疆 | 不显著增加趋势 | 不显著增加趋势 | 显著增加趋势 |
| 荒漠 | 不显著下降趋势 | 微弱显著增加趋势 | 不显著增加趋势 |
| 绿洲 | 显著增加趋势 | 不显著下降趋势 | 不显著增加趋势 |
| 山地 | 不显著增加趋势 | 不显著增加趋势 | 不显著增加趋势 |
| 东疆 | | | |
| 荒漠 | 不显著下降趋势 | 不显著增加趋势 | 不显著增加趋势 |
| 绿洲 | 不显著增加趋势 | 显著下降趋势 | 不显著下降趋势 |
| 山地 | 不显著增加趋势 | 不显著增加趋势 | 显著增加趋势 |
| 南疆 | | | |
| 荒漠 | 不显著下降趋势 | 显著增加趋势 | 不显著增加趋势 |
| 绿洲 | 不显著增加趋势 | 显著下降趋势 | 不显著下降趋势 |
| 山地 | 不显著增加趋势 | 不显著增加趋势 | 不显著增加趋势 |
| 北疆 | | | |
| 荒漠 | 不显著下降趋势 | 不显著增加趋势 | 不显著下降趋势 |
| 绿洲 | 显著增加趋势 | 不显著下降趋势 | 显著增加趋势 |
| 山地 | 不显著增加趋势 | 不显著下降趋势 | 不显著增加趋势 |
| 伊犁 | | | |
| 平原 | 不显著增加趋势 | 显著下降趋势 | 不显著增加趋势 |
| 山地 | 不显著下降趋势 | 不显著下降趋势 | 不显著下降趋势 |

与2005-2015年的发展趋势基本一致,但2016-2020年与2005-2015年趋势相反,绿洲和山地区域的植被覆盖度呈现下降趋势。伊犁地区预测后的发展趋势与2005-2015年基本一致,2016-2020年的变动幅度要比前期小,山地退化趋势明显。

研究表明新疆的植被覆盖度总体呈逐年上升趋势,局部地区略有下降。预测揭示出新疆的植被覆盖度会逐年改善。东疆、南疆的荒漠地区呈好转的趋势,但幅度极为微弱。东疆、南疆的绿洲区域呈逐年下降趋势,山地区域都为逐年上升趋势。伊犁地区的山地地区植被退化趋势明显,平原地区呈现波动改善的趋势,与其他分区作对比,相应的存在“实时”和“滞后”的效应。位于冰川积雪和水域周围的区域变异系数很大,这主要是因气候变化、冰川消融、湖泊水位波动变化等因素引起的。本文中利用的BP-ANN模型并没有考虑气温、降水等气候条件的影响因素,部分只是做了一些必要的定性分析。通过已有的年份和预测出来的年份进行下一年的模拟,预测出的其他年份数据也大体符合实际情况,这主要是因为已有年的数据序列本身就是受一系列影响因素的综合物,其不同年份、不同地理位置的像元所赋予的数字本身就是极为精确的空间变量的载体,所以通过验证,其模型的精度较高。以后还应该加入气温、降水、地形等的影响因素来进行预测研究。

参考文献(References)

- [1] Kutiel P, Cohen O, Shoshany M, et al. Vegetation establishment on the southern Israeli Coastal sand dunes between the years 1965 and 1999. *Landscape and Urban Planning*, 2004, 67(1-4): 141-156.
- [2] Steffen W. The IGBP terrestrial transects: Tools for resource management and global change research at the regional scale//Ringrose S, Chanda Ringrose S, Chanda R. *Towards Sustainable Management in the Kalahari Region: Some Essential Background and Critical Issues*, 2003.
- [3] Zhang X F, Liao C H, Jonathan Li, et al. Fractional vegetation cover estimation in arid and semi-arid environments using HJ-1 satellite hyperspectral data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21: 506-512.
- [4] Li Xiangting, Bai Jie, Li Guanglu, et al. Comparison of methods based on MODIS for estimating sparse vegetation fraction across desert in Xinjiang. *Arid Land Geography*, 2013, 36(3): 502-511. [李向婷, 白洁, 李光录, 等. 新疆荒漠稀疏植被覆盖度信息遥感提取方法比较. *干旱区地理*, 2013, 36(3): 502-511.]
- [5] Shoshany M, Kutiel P, Lavee H. Monitoring temporal vegetation cover changes in Mediterranean and arid ecosystems using a remote sensing technique. *Journal of Arid Environments*, 1996, 33: 9-21.
- [6] 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(8): 1533-1543.
- [7] Hirano Y, Yasuoka Y, Ichinose T. Urban climate simulation by incorporating satellite-derived vegetation cover distribution into a mesoscale meteorological model. *Theoretical and Applied Climatology*, 2004, 79(3/4): 175-184.
- [8] 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: 1698-1710.
- [9] Zhao Shuyi, Gong Zhaoning, Liu Xuying. Correlation analysis between vegetation coverage and climate drought conditions in North China during 2001-2013. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(5): 717-729. [赵舒怡, 宫兆宁, 刘旭颖. 2001-2013年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析. *地理学报*, 2015, 70(5): 717-729.]
- [10] Evans R A, Love R M. The step-point method of sampling. *Journal of Range Management*, 1957, 19: 208-212.
- [11] Mentis M T. Evaluation of the wheel-point and step-point methods of veld condition assessment. *African Journal of Range and Forage Science*, 1981, 16: 89-94.
- [12] Gregory S Okin, Kenneth D Clarke, Megan M Lewis. Comparison of methods for estimation of absolute vegetation and soil fractional cover using MODIS normalized BRDF-adjusted reflectance data. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 130: 266-279.
- [13] Graetz R D, Pech R R, Davis A W. The assessment and monitoring of sparsely vegetated rangelands using calibrated Landsat data. *International Journal of Remote Sensing*, 1988, 9: 1201-1222.
- [14] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote*

- Sensing of Environment, 2002, 80(1): 76-87.
- [15] Hansen M C, Defries R S, Townshend J R G, et al. Towards an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: examples using AVHRR and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83: 303-319.
- [16] Goetz S J, Wright R K, Smith A J, et al. IKONOS imagery for resource management: tree cover, impervious surfaces, and riparian buffer analyses in the mid-atlantic region. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88: 195-208.
- [17] Boyd D S, Foody G M, Ripple W J. Evaluation of approaches for forest cover estimation in the Pacific Northwest, USA, using remote sensing. *Applied Geography*, 2002, 22: 375-392.
- [18] Wang Ruiqiang, Shi Jiankang. RS- based estimation of vegetation fraction in Wuzhishan city. *Forest Resources Management*, 2010(5): 81-85. [王瑞强, 史建康. 海南省五指山市植被覆盖度估算. *林业资源管理*, 2010(5): 81-85.]
- [19] Cai Bofeng, Yu Rong. Advance and evaluation in the long time series vegetation trends research based on remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(6): 1177-1186. [蔡博峰, 于嵘. 基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价. *遥感学报*, 2009, 13(6): 1177-1186.]
- [20] Feng Lili, He Zhenming, Liu Xuefeng, et al. Dynamic monitoring of the fractional vegetation cover in Jilin province based on MODIS-NDVI data. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2014, 31(4): 492-499, 536. [冯莉莉, 何贞铭, 刘学锋, 等. 基于MODIS-NDVI数据的吉林省植被覆盖度及其时空动态变化. *中国科学院大学学报*, 2014, 31(4): 492-499, 536.]
- [21] Pan X L. A preliminary study on the stability of oasis ecosystem in arid area. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(4): 345-351.
- [22] Li Xiaosong, Gao Zhihai, Li Zengyuan, et al. Estimation of sparse vegetation cover age in arid region based on hyper spectral mixed pixel decomposition. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 152-158. [李晓松, 高志海, 李增元, 等. 基于高光谱混合像元分解的干旱地区稀疏植被覆盖度估测. *应用生态学报*, 2010, 21(1): 152-158.]
- [23] Wang Zhi, Shi Qingsan, Wang Tao, et al. Spatial-temporal characteristics of vegetation cover change in mountain-oasis-desert system of Xinjiang from 1982 to 2006. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(4): 609-618. [王智, 师庆三, 王涛, 等. 1982-2006年新疆山地—绿洲—荒漠系统植被覆盖变化时空特征. *自然资源学报*, 2011, 26(4): 609-618.]
- [24] Shi Qingdong, Lu Guanghui, Pan Xiaoling, et al. Vegetation classification method of divided area and DEM at north Xinjiang. *Arid Land Geography*, 2003, 26(3): 264-268. [师庆东, 吕光辉, 潘晓玲, 等. 遥感影像中分区分类法及在新疆北部植被分类中的应用. *干旱区地理*, 2003, 26(3): 264-268.]
- [25] Shao Shuangshuang. Spatial and temporal change of vegetation cover in Xinjiang based on FVC. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(10): 35-42. [邵霜霜. 基于FVC的新疆植被覆盖度时空变化. *林业科学*, 2015, 51(10): 35-42.]
- [26] Dai Shengpei, Zhang Bo, Wang Haijun, et al. Spatio-temporal variation characteristics of vegetation cover in Northwest China and its response to climate change. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(1): 69-76. [戴声佩, 张勃, 王海军, 等. 中国西北地区植被时空演变特征及其对气候变化的响应. *遥感技术与应用*, 2010, 25(1): 69-76.]
- [27] Zhang Fei, Tashpolat Tiyp, Ding Jianli, et al. Dynamically monitoring vegetation cover by remote sensing in the typical salinization region of Xinjiang. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(7): 27-35. [张飞, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 新疆典型盐渍区植被覆盖度遥感动态监测. *林业科学*, 2011, 47(7): 27-35.]
- [28] Wang Zhi, Chang Shunli, Shi Qingdong, et al. Markov process of vegetation cover change in arid area of Northwest China based on FVC index. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(5): 1129-1136. [王智, 常顺利, 师庆东, 等. 基于FVC指数的中国西北干旱区植被覆盖变化Markov过程. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1129-1136.]
- [29] Cui Yaoping, Liu Tong, Zhao Zhiping, et al. Using multi-spectral remote sensing data to extract and analyze the vegetation change of the western Gurbantunggut desert. *Journal of Geo-information Science*, 2011, 13(3): 305-312. [崔耀平, 刘彤, 赵志平, 等. 干旱荒漠区植被覆盖度变化的遥感监测分析. *地球信息科学学报*, 2011, 13(3): 305-312.]
- [30] Guli Jiapaer, Chen Xi, Bao Anming. Coverage extraction and up-scaling of sparse desert vegetation in arid area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(12): 2925-2934. [古丽·加帕尔, 陈曦, 包安明. 干旱区荒漠稀疏植被覆盖度提取及尺度扩展效应. *应用生态学报*, 2009, 20(12): 2925-2934.]
- [31] Niu Baoru, Liu Junrong, Wang Zhengwei. Remote sending information extraction based vegetation fraction in semiarid area. *Geo-information Science*, 2005, 7(1): 84-86. [牛宝茹, 刘俊蓉, 王政伟. 干旱区植被覆盖度提取模型的建立. *地球信息科学*, 2005, 7(1): 84-86.]
- [32] Guo Yuchuan, He Ying, Li Xia. Remote sensing inversion of vegetation coverage and optimization of vegetation index based on MODIS data in arid area. *Remote Sensing for Land&Resources*, 2011, 89(2): 115-118. [郭玉川, 何英, 李霞. 基于MODIS的干旱区植被覆盖度反演及植被指数优选. *国土资源遥感*, 2011, 89(2): 115-118.]
- [33] Shi Qingdong, Xiao Jidong, Pan Xiaoling, et al. Study on the change of vegetation coverage in Xinjiang since recent 20 years. *Arid Zone Research*, 2004, 21(4): 389-394. [师庆东, 肖继东, 潘晓玲, 等. 近20年来新疆植被覆盖变化特征研究. *干旱区研究*, 2004, 21(4): 389-394.]

- [34] Bu Ren, Bao Yuhai. Analyses of vegetation coverage changes nearly 13 years in Xilingol grassland based on MOD13A1. Information Technology for Risk Analysis and Crisis Response (RAC-14), 2014. [布仁, 包玉海. 基于MOD13A1的锡林郭勒草原近13年植被覆盖度变化分析. 风险分析和危机反应中的信息技术-中国灾害防御协会奉献分析专业委员会第六届年会论文集, 2014.]
- [35] Xu Yong, Xi Yantao, Liu Xinting. Spatial-temporal Variation of Vegetation Coverage in Jiangsu Province from 2000 to 2013. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(2): 437-444. [徐勇, 奚砚涛, 刘欣婷. 2000-2013年江苏省植被覆盖度时空变化特征. 西南农业学报, 2016, 29(2): 437-444.]
- [36] Wu Yun, Zeng Yuan, Zhaoyan, et al. Monitoring and dynamic analysis of fractional vegetation cover in the Hai River basin based on MODIS data. Resources Science, 2010, 32(7): 1417-1424. [吴云, 曾源, 赵炎, 等. 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.]
- [37] Miao Zhenghong, Liu Zhiming, Wang Zongming, et al. Dynamic monitoring of vegetation fraction change in Jilin province based on MODIS NDVI. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(3): 387-393. [苗正红, 刘志明, 王宗明, 等. 基于MODIS NDVI的吉林省植被覆盖度动态遥感监测. 遥感技术与应用, 2010, 25(3): 387-393.]
- [38] He Huijuan, Zhuojing, Wang Juan, et al. Relationship between fractional vegetation cover and humidity index after returning farmland to forest in Shaanxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(2): 439-447. [何慧娟, 卓静, 王娟, 等. 陕西省退耕还林植被覆盖度与湿润指数的变化关系. 生态学报, 2016, 36(2): 439-447.]
- [39] Zhang Xiwang, Wu Bingfang. A temporal transformation method of fractional vegetation cover derived from high and moderate resolution remote sensing data. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 1155-1164. [张喜旺, 吴炳方. 基于中高分辨率遥感的植被覆盖度时相变换方法. 生态学报, 2015, 35(4): 1155-1164.]
- [40] Yu Bohua, Lu Changhe, Lu Tingting, et al. Regional Differentiation of Vegetation Change in the Qinghai-Tibet Plateau. Process In Geography, 2009, 28(3): 391-397. [于伯华, 吕昌河, 吕婷婷, 等. 青藏高原植被覆盖变化的地域分异特征. 地理科学进展, 2009, 28(3): 391-397.]
- [41] Li Xia, Ye Jiaan. Neural-network-based cellular automata for realistic and idealized urban simulation. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(2): 159-166. [黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的单元自动的CA及真实和优化的城市模拟. 地理学报, 2002, 57(2): 159-166.]
- [42] Jing Changqing, Zhang Yongfu, Yang Xiaodong. Approach of dynamic evolution model of urban land use based on the integration of ANN and CA. Arid Zone Research, 2010, 27(6): 854-860. [井长青, 张永福, 杨晓东. 耦合神经网络与元胞自动机的城市土地利用动态演化模型. 干旱区研究, 2010, 27(6): 854-860.]
- [43] Qiao Jigang, Zou Chunyang. The Simulation of cell automaton and land use evolution based on neural network. Geomatics&Spatial Information Technology, 2012, 35(6): 17-20. [乔纪纲, 邹春洋. 基于神经网络的元胞自动机与土地利用演化模拟. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(6): 17-20.]
- [44] Xu Liping, Zhangxin. Predict drought situation in central Jilin province based on BP neural network. Jilin Water Resources, 2012(1): 40-41. [徐立萍, 张鑫. 基于BP神经网络的吉林省中部旱情预测. 吉林水利, 2012(1): 40-41.]
- [45] Lu Chunyan, Wei Haiyan, Bai Junyan. Response research of eco-environment stress and urbanization based on BP artificial neural network. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(4): 61-66. [路春燕, 卫海燕, 白俊燕. 基于BP神经网络的城市化发展生态环境压力响应研究. 干旱区资源与环境, 2012, 26(4): 61-66.]
- [46] Baret F, Weiss M, Lacaze R, et al. GEOV1: LAI and FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part I. Remote Sensing of Environment, 2013, 137: 299-309.
- [47] Jia K, Liang S L, Liu S H, et al. Global Land Surface Fractional Vegetation Cover Estimation Using General Regression Neural Networks From MODIS Surface Reflectance. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(9): 4787-4796.
- [48] Baret F, Hagolle O, Geiger B, et al. LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION: Part I: Principles of the algorithm. Remote Sensing of Environment, Elsevier, 2007, 110: 275-286.
- [49] Li Xia, Ye Jiaan. Cellular automata for simulating complex land use systems using neural networks. Geographical Research, 2005, 1: 19-27. [黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统. 地理研究, 2005, 24(1): 19-27.]
- [50] Xiao Jincheng, Ou Weixin, Fu Haiyue. Land cover classification of Yancheng Coastal Natural Wetlands based on BP neural network and ETM + remote sensing data. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(23): 7496-7504. [肖锦成, 欧维新, 符海月. 基于BP神经网络与ETM+遥感数据的盐城滨海自然湿地覆被分类. 生态学报, 2013, 33(23): 7496-7504.]
- [51] Wang Meihong, Sun Gennian, Kang Guodong. Study on relationship and spatial distribution between vegetation coverage and land degradation rate based on country-area in Xinjiang. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2008, 24(2): 1-6. [王美红, 孙根年, 康过栋. 新疆植被覆盖与土地退化关系及空间分异研究. 农业系统科

- 学与综合研究, 2008, 24(2): 1-6.]
- [52] Yang Guanghua, Bao Aaming, Chen Xi, et al. Study of the vegetation cover change and its driving factors over Xinjiang during 1998-2007. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(3): 436-445. [杨光华, 包安明, 陈曦, 等. 1998-2007年新疆植被覆盖变化及驱动因素分析. *冰川冻土*, 2009, 31(3): 436-445.]
- [53] He Jinyun, Zhang Mingjun, Wang Peng, et al. New progress of the study on climate change in Xinjiang. *Arid Zone Research*, 2011, 47(7): 27-35. [贺晋云, 张明军, 王鹏, 等. 新疆气候变化研究进展. *干旱区研究*, 2011, 28(3): 499-508.]
- [54] Chen Yaning, Xu Changchun, Yang Yuhui, et al. Hydrology and water resources variation and its responses to regional climate change in Xinjiang. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1331-1341. [陈亚宁, 徐长春, 杨余辉, 等. 新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应. *地理学报*, 2009, 64(11): 1331-1341.]
- [55] Chang Shunli. Sensitivity analysis on land cover change to climate change in last ten years across Xinjiang [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2003. [常顺利. 近十年新疆土地覆盖变化对气候变化的敏感性分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2003.]
- [56] Zhu Lei, Luo Geping, Chenxi, et al. Detection of land use /land cover change in the middle and lower reaches of the Ili River, 1970-2007. *Progress in Geography*, 2010, 29(3): 292-300. [朱磊, 罗格平, 陈曦, 等. 伊犁河中下游近40年土地利用与覆盖变化. *地理科学进展*, 2010, 29(3): 292-300.]
- [57] National Meteorological Information Center. Statistical Method of National Ground Climate Data (1961-1990). Internal Documents, 1990. [国家气象中心. 全国地面气候资料(1961-1990)统计方法. 内部文献, 1990.]
- [58] Hajigul Ablimit, et al. Study on the dynamic changes of small lakes of Bosten Lake and its drivers. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(7): 3053-3056. [阿吉古丽·阿卜力米提, 海米提·依米提, 祖皮艳木·买买提, 等. 博斯腾湖小湖面积动态变化及驱动力研究. *安徽农业科学*, 2013, 41(7): 3053-3056.]
- [59] Hajigul Ablimit. Study on the dynamic changes of small lakes of bosten lake ant its drivers the past 40 years [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2013. [阿吉古丽·阿卜力米提. 近40a来博斯腾湖小湖面积变化及驱动机理研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2013.]
- [60] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The response of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (II): Hazards effects. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(6): 1355-1370. [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II): 灾害效应. *冰川冻土*, 2013, 35(6): 1355-1370.]
- [61] Li Chengxiu, Yang Taibao, Tian Hongzhen. Variation of western Kunlun Mountain glaciers monitored by remote sensing during 1976-2010. *Mountain Research*, 2015, 33(2): 157-165. [李成秀, 杨太保, 田洪阵. 近40年来西昆仑山冰川及冰湖变化与气候因素. *山地学报*, 2015, 33(2): 157-165.]
- [62] Deng Zhengyong, Zhang Qiang, Yin Xianzhi, et al. Response of drought damage to arid climate change. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(1): 114-118. [邓振镛, 张强, 尹宪志, 等. 干旱灾害对干旱气候变化的响应. *冰川冻土*, 2007, 29 (1): 114-118.]
- [63] Han Ping, Xue Yan, Su Hongchao. Precipitation signal of the climatic shift in Xinjiang region. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2) : 179-182. [韩萍, 薛燕, 苏宏超. 新疆降水在气候转型中的信号反映. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 179-182.]
- [64] Bayard D, Stihli M, Parriaux A, et al. The influence of seasonally frozen soil on the snow melt runoff at two alpine sites in southern Switzerland. *Journal of Hydrology*, 2005, 309: 66-84.

Experimental analysis of spatial and temporal dynamics of fractional vegetation cover in Xinjiang

HE Baozhong^{1,2}, DING Jianli^{1,2}, ZHANG Zhe^{1,2}, Abduwasit Ghulam³

(1. College of Resource and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Key Laboratory for Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

3. Center for Sustainability, Saint Louis University, Saint Louis MO 63108, USA)

Abstract: This paper presents spatial and temporal dynamics of fraction of vegetation in Xinjiang Uygur Autonomous Region of China. Fractional vegetation cover (FVC) was

estimated by using MODIS-NDVI data from 2005 to 2015. The study area was divided into 11 ecological and climate regions according to the altitude and land cover. Slope, variability and linear regression model were used to analyze the present situation and future tendency for FVC in Xinjiang and its sub-regions. The BP-ANN neural network analysis was used to predict FVC from 2016 to 2020, and the FVC trend over the entire study area during 2005-2020 was discussed. The results showed that: From 2005 to 2015, FVC increased in general over time, and spatially, decreased from northwest to southeast; In mountain areas, FVC increased in general; desert system showed no significant change, and multi-average FVC was about 0.10. The dynamic change of FVC was mainly caused by precipitation. We observed an improvement of vegetation cover over oasis and desert ecotone. FVC showed a significant increase over oasis. The year 2009 was the turning point with a historical low value. The variation near areas covered by ice and snow, river and lakes was remarkable, showing a change rate of 150%-316%. This change was probably responded by glacial depletion and fluctuation changes of lakes due to global climate change. The ecosystem in northern Xinjiang is obviously better than that in southern and eastern Xinjiang. In terms of oasis, the northern part is improved remarkably ($P = 0.001$). There was an obvious FVC fluctuation in Yili region compared to other regions. The mountain area showed an obvious degeneration tendency. The local minima point of FVC was observed in Yili in 2008, while it was in the other three regions in 2009. The lag of local minima occurring in the northern and southern parts of the study areas may have been caused by precipitation and temperature variation across the study area. Predicted average FVC from 2016-2020 demonstrated trends and patterns identical to 2005-2015 with some local differences. For example, FVC increases ($P = 0.002$) during 2005-2020 in general. In desert areas, the trend is from non-significant decrease during 2005-2015 to non-significant increase for 2005-2020. In oasis region, predicted FVC showed a slightly rising trend compared to the obviously rising trend in 2005-2015. The multi-average FVC is above 0.62 and it showed improvement during 2005-2020. For sub-regions and ecosystems, the trend differs significantly between 2005-2015 and 2005-2020. In northern part, the trend in 2005-2020 was almost the same with that of 2005-2015, while in 2016-2020 the tendency was opposite to 2005-2015, with oasis and mountain FVC showing a decreasing trend. In Yili, the general trend in 2005-2020 was almost the same with that of 2005-2015, but the amplitude of variation became smaller in 2016-2020 when compared to early stage and the mountain area showing a remarkably decreasing trend. Our results demonstrated that BP-ANN model can predict FVC in Xinjiang with statistical significance, the coefficient of determination (R^2) of 0.95, root-mean-square error of 0.05, suggesting that this method gained a satisfactory result.

Keywords: fractional vegetation cover (FVC); moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS); BP artificial neural network; climate change; Xinjiang