

## 湖南省植被覆盖度动态变化监测及影响因素分析

彭晶晶<sup>1</sup>, 闫如柳<sup>2\*</sup>

(1. 长沙市气象局, 湖南长沙 410205; 2. 湖南省气象科学研究所, 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 湖南长沙 410118)

**摘要** 利用 MODIS NDVI 月平均数据及湖南省标准气象站的气象数据, 采用像元二分模型对湖南省的植被覆盖度进行估算, 并对其时空变化及影响因素进行分析。结果表明, 湖南省植被每年 3 月进入生长季, 9 月结束。植被覆盖度总体呈上升趋势, 上升趋势率为 0.59%/a; 湖南省 89.16% 的区域植被覆盖度呈上升趋势, 仅 1.29% 的区域呈下降趋势。植被覆盖度减少最为严重的区域主要集中在长沙、岳阳等城市的周边地区; 气温是影响植被覆盖度的主要气候因子。

**关键词** 植被覆盖度; 时空变化; 遥感; 影响因素

中图分类号 X 835 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)07-0051-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.07.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Monitoring and Influencing Factors Analysis for Vegetation Coverage Dynamic Change in Hunan Province

PENG Jing-jing<sup>1</sup>, YAN Ru-liu<sup>2</sup> (1. Changsha Meteorological Bureau, Changsha, Hunan 410205; 2. Key Laboratory of Preventing and Reducing Meteorological Disaster, Hunan Institute of Meteorological Science, Changsha, Hunan 410118)

**Abstract** Using the monthly average data of MODIS NDVI and the meteorological data of the standard meteorological station in Hunan Province, the vegetation fractional coverage (VFC) in Hunan Province was estimated by the pixel dichotomy model and its temporal and spatial changes and influencing factors were analyzed. The results showed that vegetation began growing in March, and ended in September. The VFC showed an upward trend with rising rate of 0.59%. The area with increasing trend of VFC accounted for 89.16%, while the area with reduction trend accounted for 1.29%. The areas with the most serious VFC reduction were mainly concentrated in the surrounding areas such as Changsha and Yueyang; temperature was the main climatic factor affecting the VFC.

**Key words** Vegetation fractional coverage (VFC); Temporal and spatial change; Remote sensing; Influencing factor

陆地植被与大气圈、水圈和生态圈关系密切, 是连接大气、土壤和水体的自然纽带, 它连接着陆地生态系统间的能量循环<sup>[1]</sup>, 是调节区域气候和全球气候的重要因子<sup>[2]</sup>。同时, 陆表植被与地表的水源涵养和水土保持能力密切相关, 在防止水土流失、减缓径流、保护生态系统和自然环境等方面起着关键作用<sup>[3-4]</sup>。植被改变了陆表的覆盖属性, 动态监测植被覆盖的时空变化状况对研究山区地理格局和区域生态环境状况有重要意义<sup>[5-7]</sup>。

卫星遥感具有覆盖广、周期短的特点, 在大范围监测方面具有天然的优势。近年来, 通过卫星数据反演植被净初级生产力、叶面积指数等植被参数来监测植被生长状况已成为生态监测的重要手段<sup>[8-9]</sup>。这些参数中, 归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)与植被覆盖度、生物量、叶面积指数等密切相关, 常被用于监测植被的生长状况<sup>[10-12]</sup>。如王一富等<sup>[13]</sup>对大理苍山保护区的植被覆盖度进行了动态监测; 廖春贵等<sup>[14]</sup>对北部湾经济区植被覆盖变化的特征及驱动因素进行了研究。植被覆盖的变化与气候因子存在内在联系<sup>[15-17]</sup>, 在气候变化背景下, 近年来北半球的植被覆盖发生了显著变化, 其中我国除局部地区略有下降外, 总体上呈现上升趋势<sup>[18]</sup>。然而, 植被覆盖在空间上表现出显著的区域差异性, 其与气候因子的相关性也存在明显的空间异质性。因此, 探讨区域生态系统内植被覆盖度时空分布特征及对气候变化的响应, 对保护区域生物多样性与生态

安全具有重要意义。考虑到植被覆盖度时空变化的区域性差异及其与气候因子之间的关系, 笔者选取湖南省为研究区域, 探讨 2000—2020 年湖南植被覆盖度的空间变化特征和变化趋势及其对气温、降水的时空响应。

## 1 资料与方法

**1.1 研究区域概况** 湖南地处云贵高原向江南丘陵、南岭山脉向江汉平原过渡的地带, 地势呈三面环上、朝北开口的马蹄形。全省海拔西高中低, 西部和南部多山区, 中部多丘陵, 北部为平原。湖南气候为大陆型亚热带季风气候, 雨热同期, 降雨年际变化大, 夏季高温多雨, 冬季干燥少雨。在地形和季风气候共同影响下, 湖南的森林植被以常绿阔叶林乔木和温带阔叶林为主。20 世纪 50—80 年代, 由于人为的过度砍伐, 水土流失、石漠化现象严重。从 2000 年以后, 全省在国家政策号召下进行了退耕还林、封山育林等一系列森林修复工作, 近 20 年来生态植被状况呈改善趋势。

**1.2 数据源及预处理** 该研究中使用的 MODIS NDVI 遥感数据来源于美国国家航天局(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>), 空间分辨率为 1 km×1 km, 时间跨度为 2000—2020 年。对应的同期气象数据由湖南省信息中心提供, 湖南省气象站点分布如图 1 所示。

使用 MRT 批处理软件对 MODIS NDVI 数据进行裁剪、拼接及投影转换, 采用最大值合成法(maximum value composites, MVC)<sup>[19]</sup>将旬 NDVI 数据合成得到月平均 NDVI, 进而采用像元二分模型<sup>[20]</sup>计算得到同期植被覆盖度(vegetation fractional coverage, VFC)。根据气象站点的经纬度, 采用 Kriging 空间插值法, 获得 1 km×1 km 空间分辨率的气温、降水格点数据。

**基金项目** 湖南省气象局 2020 年短平快课题(XQKJ20B024)。

**作者简介** 彭晶晶(1987—), 女, 湖南长沙人, 工程师, 硕士, 从事生态监测与评估研究。\* 通信作者, 助理工程师, 硕士, 从事遥感数据分析与应用研究。

**收稿日期** 2021-07-19

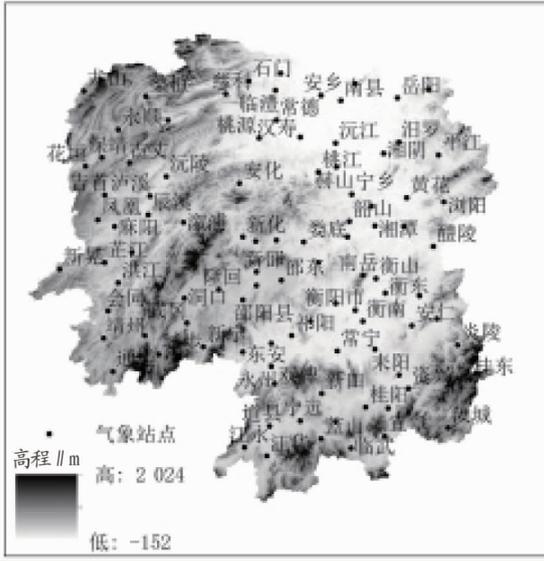


图1 湖南省气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in Hunan Province

**1.3 植被覆盖度估算** 植被覆盖度(VFC)指的是植被(包括叶、茎、枝)在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比。采用像元二分模型计算植被覆盖度可以表示为:

$$VFC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (1)$$

$$NDVI_{soil} = (VFC_{max} \times NDVI_{min} - VFC_{min} \times NDVI_{max}) / (VFC_{max} - VFC_{min}) \quad (2)$$

$$NDVI_{veg} = \frac{(1 - VFC_{min}) \times NDVI_{max} - (1 - VFC_{max}) \times NDVI_{min}}{VFC_{max} - VFC_{min}} \quad (3)$$

当区域内可以近似取  $VFC_{max} = 100\%$ 、 $VFC_{min} = 0$  时,式

(1)可简化为:

$$VFC = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (4)$$

当区域内不能近似取  $VFC_{max} = 100\%$ 、 $VFC_{min} = 0$  时,则  $VFC_{max}$ 、 $VFC_{min}$  取实测数据中的最大值和最小值。若没有实

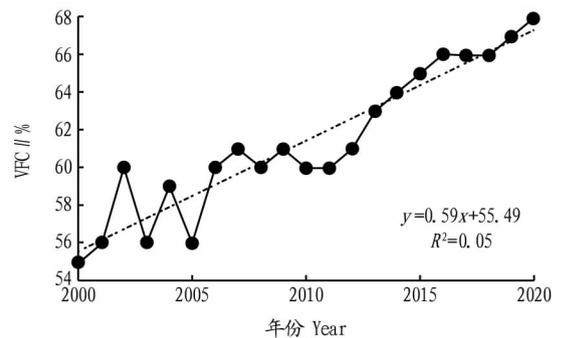
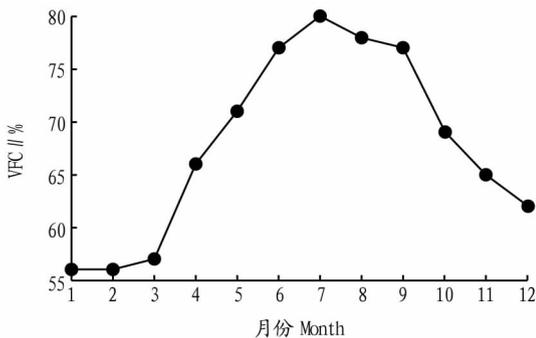


图2 2000—2020年湖南省VFC月变化(a)和年际变化(b)

Fig. 2 Monthly variation (a) and interannual variation (b) of VFC in Hunan Province from 2000 to 2020

从2000—2020年湖南省植被覆盖度年际变化(图2b)可以看出,2000—2009年湖南省植被覆盖度总体呈现波动增长趋势;2010—2020年呈稳定增长,2020年达到68%,为最高值。近21年总体增长速率约为0.59%/a,表明研究时段内湖南省生态环境显著改善。

为探讨湖南省21年来VFC的年际变化特征,结合月平

均VFC结果(图2a),将湖南省VFC分为3级:VFC<55%为低植被覆盖度,55%≤VFC<70%为中植被覆盖度,VFC≥70%为高植被覆盖度。从2000和2020年各级别VFC统计情况(表1)可以看出,2000年湖南省VFC主要以中、低植被覆盖度为主;2020年,VFC以中、高植被覆盖度为主,高植被覆盖度占湖南省土地面积的49.82%,中植被覆盖度和高植被覆

测数据,则取一定置信度范围内的  $NDVI_{max}$ 、 $NDVI_{min}$ 。

**1.4 趋势系数** 趋势系数指的是像元的VFC随时间的变化率( $K$ )。当 $K>0$ 时,表示VFC随时间呈增加趋势,数值越大,则趋势越大;当 $K<0$ 时,代表VFC随时间呈下降趋势。

$$K = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times VFC_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n VFC_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (5)$$

式中, $i$ 代表年份; $n$ 为总年数,即21年; $VFC_i$ 为第 $i$ 年的VFC值。根据VFC像元趋势系数和显著水平,可将植被覆盖度变化趋势划分为7个等级:极显著改善( $K>0.75\%$ )、显著改善( $0.50\%<K\leq 0.75\%$ )、改善( $0.25\%<K\leq 0.50\%$ )、基本不变( $-0.25\%\leq K\leq 0.25\%$ )、退化( $-0.50\%\leq K<-0.25\%$ )、显著退化( $-0.75\%\leq K<-0.50\%$ )、极显著退化( $K<-0.75\%$ )。

**1.5 相关分析** 为了更进一步研究VFC与气温和降水之间的响应关系,采用常用的Pearson相关对VFC值、标准化后的年降水量和年平均气温进行计算,公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中, $y_i$ 为气候因子第 $i$ 年的值, $\bar{y}$ 为气候因子多年平均值; $x_i$ 为第 $i$ 年VFC平均值; $\bar{x}$ 为2000—2020年VFC的年平均。当 $r$ 达到显著性水平( $P<0.05$ )标准时,即代表VFC与气候因子之间具有显著的线性相关关系。

## 2 结果与分析

**2.1 湖南地区植被覆盖度时间变化特征** 经计算,2000—2020年湖南省的VFC平均值为62%。从图2a可以看出,湖南省月平均VFC值变化明显,在56%~80%波动。其中9—12月呈下降趋势,1月份为全年最低,仅为56%,3月份之后VFC呈显著上升趋势,7月份达到一年中的最高值,为80%。这表明研究时段内湖南植被3月进入生长季,生长缓慢,4—6月生长最快,7月达到峰值。

盖度总和占全省土地面积的 85.39%。

表 1 2000—2020 年湖南省 VFC 分级面积变化统计

Table 1 Statistics of VFC graded area changes in Hunan Province from 2000 to 2020

VFC 分级 VFC grading	2000 年		2020 年	
	面积 Area/km <sup>2</sup>	占比 Percentage/%	面积 Area/km <sup>2</sup>	占比 Percentage/%
低 Low	91 742	47.36	28 308	14.61
中 Medium	91 941	47.46	68 914	35.57
高 High	10 044	5.18	96 505	49.82

**2.2 湖南地区植被覆盖度空间变化特征** 合成年 VFC 影像后,采用公式(5)计算了湖南省内各个像元 2000—2020 年 VFC 的变化情况(K 值),并与湖南省行政边界叠加,如图 3 所示。从图 3 可以看出,VFC 明显增加的区域主要集中在湘西和湘南;VFC 明显减少的区域主要集中在湘中区域,大部分分布在长沙、岳阳等城市的周边地区。VFC 总体上呈西南部向东北部递减。

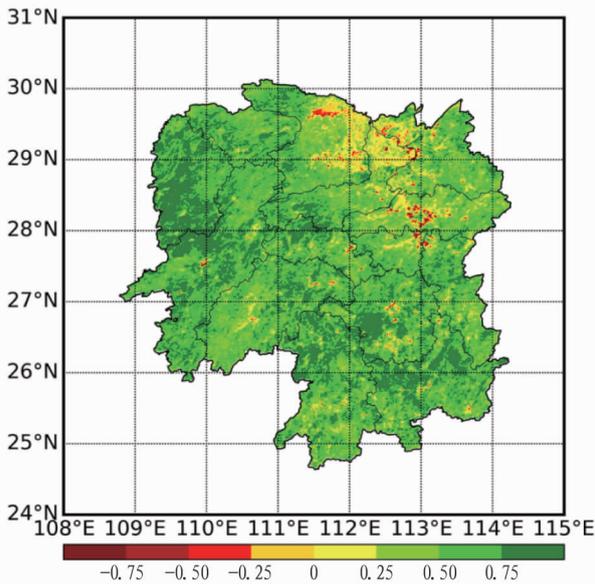
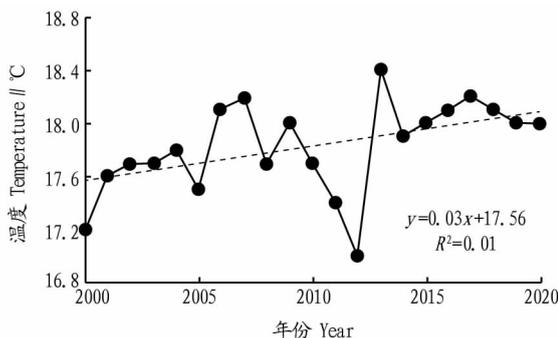


图 3 2000—2020 年湖南省 VFC 变化趋势率

Fig. 3 Trend rate of VFC change in Hunan Province from 2000 to 2020

从 2000—2020 年湖南省 VFC 变化情况统计(表 2)可以看出,近 21 年来 VFC 急剧减少,即减少趋势率大于 0.75%以



上的极显著退化区域面积占研究区域总面积的 0.23%,约为 441 km<sup>2</sup>;VFC 增加趋势率大于 0.75%的极显著改善区域面积占研究区域总面积的 22.67%,约为 43 911 km<sup>2</sup>。湖南植被覆盖度呈增加趋势的面积约占研究面积的 89.16%,减少趋势的面积占总面积的 1.29%。

表 2 2000—2020 年湖南省 VFC 变化趋势区域统计

Table 2 Regional statistics of VFC change trends in Hunan Province from 2000 to 2020

VFC 变化趋势等级 VFC change trend level	面积 Area km <sup>2</sup>	占比 Percentage %
极显著退化 Extremely significant degeneration	441	0.23
显著退化 Significant degeneration	517	0.27
退化 Degeneration	1 541	0.79
基本不变 Basically unchanged	18 508	9.55
改善 Improvement	46 846	24.18
显著改善 Significant improvement	81 963	42.31
极显著改善 Extremely significant improvement	43 911	22.67

### 2.3 植被变化驱动因子

**2.3.1 气候因子与 VFC 变化的关系。**从图 4 可以看出,2000—2020 年湖南省气温和降水量总体均呈上升趋势,其中温度增速为 0.03 °C/a,降水量增速为 5.74 mm/a。此时段内 VFC 的年度变化趋势(图 2b)与气温和降水量的年度变化波动相似。

为进一步探究气温和降水量与 VFC 年内变化关系,采用公式(6)计算了气温和降水量与 VFC 年内变化的相关系数。计算结果表明,VFC 与气温的相关系数为 0.618( $P=0.002$ ),与年降水量的相关系数为 0.340( $P=0.130$ ),表明在研究时段内气温对 VFC 的影响更为显著。

**2.3.2 人类活动与 VFC 变化的关系。**人类活动对植被的影响体现在 2 个方面:一方面通过生态工程(如退耕还林还草等)的实施改善区域生态环境,增加植被覆盖;另一方面随着经济的发展,城市工业、交通及住宅用地等的扩张,城市化进程的加快会使植被覆盖减少,如 20 世纪 50—80 年代乱砍滥伐造成湖南省水土流失严重,石漠化严重,城市及周边人口的聚集,交通、住宅、工业用地等紧张,导致植被显著减少(图 3)。自 1999 年以来,国家正式启动退耕护岸林工程,湖南省

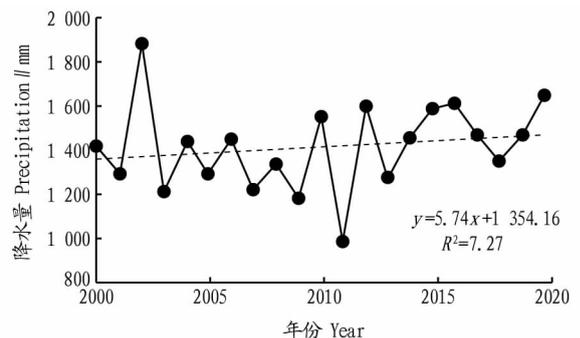


图 4 2000—2020 年湖南省气温和降水量年际变化

Fig. 4 Interannual changes of temperature and precipitation in Hunan Province from 2000 to 2020

也积极实施以天然林保护、禁止乱砍滥伐、退耕还林为主的生态环境保护政策和建设工程,极大增加了湖南省植被覆盖。

### 3 结论与讨论

该研究以 MODIS NDVI 数据为基础,基于像元二分模型,探索了湖南省 2000—2020 年植被覆盖度时空变化规律及发生变化的驱动因素,结果发现,湖南省 2000—2020 年植被覆盖度整体呈上升趋势,增速为 0.59%/a。其中,植被覆盖度呈增加趋势的面积占研究区总面积的 89.16%,增加较为明显的区域主要集中在湘西和湘南;减少趋势区域的面积占研究区域总面积的 1.29%,主要集中在长沙、岳阳等城市的周边地区。气候因子中气温和降水量与植被覆盖度的年变化相关,且相关性较强,研究时段内气温是影响植被覆盖度变化的主要因素。湖南省在 1999 年启动实施退耕还林工程以来,通过退耕还林、封山育林和人工造林等措施,极大地改善了湖南的植被生态状况,提升了植被覆盖度面积。

植被覆盖度变化受众多因素的综合影响,该研究主要从气候因子、人类活动 2 个方面分析了湖南省 2000—2020 年植被覆盖度变化情况。需指出的是,气候因子包括气压、湿度、气温、降水量、风速和日照等,该研究中只是讨论了气温和降水量与 VFC 的关系,在以后的工作可进一步加强其他气候因子与 VFC 响应方面的研究。此外,地形地貌对植被的时空分布具有一定的影响,湖南省多丘陵,海拔差异明显,水—土—植被具有高度的相互依赖性,故在今后的研究中可加强地形地貌因子与不同植被类型植被覆盖的研究,从而为湖南省植被生态监测提供科学依据。

### 参考文献

[1] NEMANI R R, KEELING C D, HASHIMOTO H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. *Science*, 2003, 300(5625): 1560—1563.

[2] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关

系:基于 NOAA 时间序列数据分析[J]. *遥感学报*, 1998, 2(3): 204—210.

[3] 吴云. 基于 RS 和 GIS 的植被覆盖度估算及动态变化分析:以三北防护林工程区和海河流域分析[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2009.

[4] 王朗, 傅伯杰, 吕一河, 等. 生态恢复背景下陕北地区植被覆盖的时空变化[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(8): 2109—2116.

[5] 祁燕, 王秀兰, 冯仲科, 等. 基于 RS 与 GIS 的北京市植被覆盖度变化研究[J]. *林业调查规划*, 2009, 34(2): 1—4.

[6] WILSON J S, CLAY M, MARTIN E, et al. Evaluating environmental influences of zoning in urban ecosystems with remote sensing[J]. *Remote sensing of environment*, 2003, 86(3): 303—321.

[7] 南颖, 刘志锋, 董叶辉, 等. 2000—2008 年长白山地区植被覆盖度变化对气候的响应研究[J]. *地理科学*, 2010, 30(6): 921—928.

[8] 张霞霞, 李晓兵, 陈云浩. 草地植被覆盖度的多尺度遥感与实地测量方法综述[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(1): 85—93.

[9] 陈晋, 陈云浩, 何春阳, 等. 基于土地覆盖分类的植被覆盖度估算亚像元模型与应用[J]. *遥感学报*, 2001, 5(6): 416—422.

[10] 何月, 樊高峰, 张小伟, 等. 浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应[J]. *生态学报*, 2012, 32(14): 4352—4362.

[11] 沙文生, 魏淑花, 牟高峰, 等. 宁夏草地植被覆盖度动态变化监测[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(23): 10—15, 20.

[12] KAUFMAN Y J, TANRE D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 1992, 30(2): 261—270.

[13] 王一富, 袁磊. 云南大理苍山保护区植被覆盖度动态变化遥感监测与分析[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(8): 2997—3002.

[14] 廖春贵, 熊小菊, 胡宝清, 等. 北部湾经济区植被覆盖变化特征及驱动因素[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(19): 20—25.

[15] JING X, YAO W Q, WANG J H, et al. A study on the relationship between dynamic change of vegetation coverage and precipitation in Beijing's mountainous areas during the last 20 years[J]. *Mathematical and computer modelling*, 2011, 54(3/4): 1079—1085.

[16] 毕晓丽, 王辉, 葛剑平. 植被归一化指数(NDVI)及气候因子相关起伏型时间序列变化分析[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(2): 284—288.

[17] 孙睿, 刘昌明, 朱启疆. 黄河流域植被覆盖度动态变化与降水的关系[J]. *地理学报*, 2001, 56(6): 667—672.

[18] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(16): 5331—5342.

[19] HOLBEN BRENT N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data[J]. *International journal of remote sensing*, 1986, 7(11): 1417—1434.

[20] QUARMBY N A, TOWNSHEND J R G, SETTLE J J, et al. Linear mixture modelling applied to AVHRR data for crop area estimation[J]. *International journal of remote sensing*, 1992, 13(3): 415—425.

(上接第 47 页)

[4] 宋金亮, 朱磊, 王震, 等. 低温弱光胁迫对西葫芦幼苗生长指标的影响[J]. *北方园艺*, 2017(1): 13—17.

[5] 王春萍, 张世才, 杨小苗, 等. 辣椒苗期耐低温弱光鉴定指标研究[J]. *核农学报*, 2021, 35(4): 989—996.

[6] 张红梅, 金海军, 卜立君, 等. 黄瓜高代自交系对低温弱光的生理响应及其抗性评价[J]. *分子植物育种*, 2021, 19(10): 3415—3423.

[7] 董灵迪, 杨玉波, 石琳琪, 等. 低温弱光对番茄不同品种的影响[J]. *华北农学报*, 2016, 31(S1): 183—187.

[8] 高青海, 王亚坤, 郭远远, 薄皮甜瓜种质资源苗期耐低温弱光鉴定及形态指标选择[J]. *浙江农业学报*, 2016, 28(8): 1360—1367.

[9] 许勇, 王永健. 黄瓜耐低温研究中几个问题的讨论[C]//韩振海, 黄卫东, 许雪峰. 中国科学技术协会第二届青年学术年会园艺学论文集. 北京:北京农业大学出版社, 1995.

[10] 王永健, 姜亦巍, 曹宛虹, 等. 低温对不同品种黄瓜种子萌发、过氧化物酶及同功酶的影响[J]. *华北农学报*, 1995, 10(2): 72—76.

[11] 李丹丹, 邹士成, 刘思源, 等. 低温弱光对黄瓜幼苗生长发育的影响[J]. *北方园艺*, 2015(18): 41—44.

[12] 徐婷, 樊景胜, 连永利, 等. 低温对高纬度半干旱区玉米主栽品种种子萌发特性的影响[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(9): 25—27.

[13] 张健, 张帆, 田佳星, 等. 西葫芦幼苗对低温弱光的响应及耐性评价指标筛选[J]. *北方园艺*, 2021(4): 1—9.

(上接第 50 页)

[9] 柳凯, 张霞, 孙玉东, 等. 江苏淮安蒲菜种群特征及优质生产技术要点[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(10): 227, 232.

[10] 袁宜如, 邹峥嵘, 高光林, 等. 鄱阳湖区狭叶香蒲人工栽培技术[J]. *现代农业科技*, 2013(6): 172.

[11] 孙元学, 杜登科, 邓正春, 等. 特产蔬菜蒲菜优质高产高效生产关键技术[J]. *农业科技通讯*, 2014(9): 249—251.

[12] 张霞, 王可心. 淮安蒲菜栽培技术[J]. *现代农业科技*, 2013(24): 109.

[13] 叶春, 于海婵, 宋祥甫, 等. 基底条件和栽培方式对芦苇和香蒲生长发育的影响[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(1): 59—63.

[14] 张希祥, 慈维顺, 王国雨. 常见水生植物栽培技术措施[J]. *天津农林*

科技, 2012(3): 17—18.

[15] 王加强, 孙光闻, 刘厚诚, 等. 象牙菜优质高产栽培技术[J]. *农村新技术*, 2009(19): 9—10.

[16] 梁淑敏, 李燕山, 杨琼芬, 等. 4 个栽培密度对 6 个马铃薯基因型微型薯繁育种薯的影响[J]. *西南农业学报*, 2017, 30(11): 2454—2460.

[17] 孟焕, 王雪宏, 佟守正, 等. 预处理方式对香蒲和芦苇种子萌发的影响[J]. *生态学学报*, 2013, 33(19): 6142—6146.

[18] 孟焕, 王雪宏, 佟守正, 等. 湿地土壤埋深对芦苇、香蒲种子萌发的影响[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(9): 2320—2325.

[19] 袁桂香, 吴爱平, 葛大兵, 等. 不同水深梯度对 4 种挺水植物生长繁殖的影响[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(12): 2690—2697.