西北林学院学报 2020,35(1):239-245
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2020.01.36

基于图像处理的疏透度测定及结构关系研究

李晓烨[1],王克俭[1*],谷建才[2],唐　浩[1]

(1.河北农业大学 信息科学与技术学院,河北 保定 071000;2.河北农业大学 林学院,河北 保定 071000)

摘　要:为快速、准确地测定防风林林带疏透度,建立林带疏透度与林带结构因子间的关系模型,为防风林建设及调整提供合理化意见。使用图像处理技术对获取的防风林林带照片进行自动识别,通过Otsu算法自动将树木实体区域和孔隙区域分割,从而测定林带疏透度。并采用相关性分析和逐步线性回归法建立疏透度与林带结构因子间的关系模型。结果表明,采用Otsu算法测定林带疏透度的方法与图像处理软件(Photoshop)测定结果无明显差异,该方法操作简单、效率高,能够快速、准确测定防风林林带疏透度。防风林疏透度与林带行数、棵数、枝下比例、株行距、密度存在显著性相关关系,构建疏透度与林带行数、密度间的关系模型:$\beta=-0.060\ 1N-0.065\ 8\rho+0.810\ 9$($R^2=0.961\ 3$,$P=0.000\ 29$)。根据建立的防风林林带疏透度与林带结构因子间的关系模型,可对防风林的建设提供科学合理化的指导,使其发挥更好的防护效应。

关键词:防护林林带;疏透度;图像处理技术;自动识别;关系模型

中图分类号:S727.23　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1001-7461(2020)01-0239-07

Image Processing Based on the Measurement of Opacity and Structural Relationship

LI Xiao-ye[1],WANG Ke-jian[1*],GU Jian-cai[2],TANG Hao[1]

(1.*College of Information Science and Technology,Agricultural University of Hebei,Baoding* 071000,*Hebei,China*;
2.*Forestry of College,Hebei Agricultural University,Baoding* 071000,*Hebei,China*)

Abstract: The objectives of this study were to quickly and accurately measure the porosity of windbreaks,to establish a relationship model between shelterbelt porosity and the structural factors of forest belts,and to provide rationalization opinions for the construction and adjustment of windbreaks. Image processing technology was used to automatically identify the acquired windbreak forest photos,and the Otsu algorithm could automatically separate the physical and porous areas of the tree to determine the porosity. Correlation analysis and stepwise linear regression were adopted to establish a relationship model between porosity and the structural factors of the forest belt. The results showed that there was no significant difference between the method of measuring porosity of forest belts and the image processing software (Photoshop) by using Otsu algorithm. The method was simple and efficient,and could quickly and accurately determine the porosity of windbreak forest. There existed a significant correlation between the porosity of windbreak and line number,the number of tree,branch proportion,plant spacing,and density. The relationship between porosity and the number of rows and density of forest belts was constructed:$\beta=-0.060\ 1N-0.065\ 8\rho+0.810\ 9$($R^2=0.961\ 3$,$P=0.000\ 29$). According to the established relationship model between the shelterbelt porosity and the structural factors of the forest belt,it could provide scientific and rational guidance for the construction of the windbreak,so that it could play a better protective effect.

收稿日期:2019-02-27　**修回日期:**2019-07-05

基金项目:国家重点研发计划课题:坝上高原及华北北部山地沙化土地治理与沙产业技术研发及示范(2016YFC0500802);河北农业大学人才研究项目(YJ201829);河北省青年人才项目(BJ2019008)。

作者简介:李晓烨,女,硕士在读,研究方向:计算机应用技术。E-mail:986037834@qq.com

* **通信作者:**王克俭,女,教授,硕士生导师,研究方向:人工智能等计算机方面。E-mail:33688415@qq.com

Key words: windbreak forest belt; porosity; image processing technology; automatic identification; relational model

防风林是以保持、控制、稳定和改善生态环境为主要目的的一种森林类型[1]。防护林带的防护作用与防风效能、防风林行数、宽度、林冠高、枝下高、株行距和疏透度等林带结构因子密切相关[2-4]。其中，林带疏透度(透光疏透度)是判断林带结构的重要指标[5-6]。测量疏透度的方法包括：目测法、方格景框法、照相法、概率估计法及间接的模型测量方法[7]。封斌等[8]用目测法测定林带的疏透度，确定林带结构类型。由于这些方法，操作性难且稳定性差，不适合用来计算疏透度。1987 年，国外学者 W. A. Kenny[9]通过数字化扫描的方法测量单株树木疏透度，开启了数字化测量疏透度的先河。为更准确测量林带疏透度，众多学者采用“光学相机”与“数字图像处理”相结合的方法，但因获取相片的成本高、相片处理过程中易模糊及结果精确度差。2002 年，关文彬等[10]、李素莉等[11]、杨雨春等[12]采用数码相机与 CIAS 软件(Image Analysis Softeare)对防风林林带疏透度数字化测定。2011 年，徐满厚等[13]借助数码相机与计算机图像处理软件 Photoshop 对新疆准格尔地区的防风固沙林林带疏透度进行数字化测定，并建立了疏透度与林带结构因子间的关系模型。2015 年，周杰等[14]利用 Image-Pro Plus 数字图像分析软件计算防护林的疏透度。可见，随着计算机图像处理技术的不断完善和数码相机的出现，利用“计算机图像处理技术”和“数码相机”测定防风林的疏透度已经成为计算疏透度的方式。其中，数码相机与图像处理软件 Photoshop 相结合的方法是防风林林带疏透度测定的主要方法[2,4]。这种方法虽然能够计算出林带疏透度，但将彩色图像转化为灰度图像进行林带枝体与孔隙分割时，是通过肉眼识别树木实体区域和孔隙区域，操作过程复杂且缓慢、效率低且不能避免人为因素的干扰。所以，本研究借助数码相机与图像处理技术中的 Otsu 算法对防风林的疏透度进行测定。并将采用相关性分析与逐步回归分析的方法，建立防风林林带疏透度与林带结构因子之间的关系模型，以便为防风林林带结构的配置和优化提供科学理论的方法和手段。

1 材料与方法

1.1 样本的获取

本研究采用的防风林带是风洞试验中依据比例 1∶100 制定的落叶松模型树。单株模型树的固定高度为 10 cm(图 1)。在获取林带图像时，应避免光线过强或过弱，以免对图像的处理产生影响[15]。模型树的结构比较复杂，在图像处理的过程中，如目标与背景之间的颜色差别显著，则便于图像分割[16]，故选取白色背景板。将林带置于白色背景板前方，利用数码相机在垂直于林带 20～30 cm 处进行拍摄，获取林带图像，存入计算机中以便使用。本次获取不同结构的林带图像，并记录林带行数、棵数、平均枝下比例、株行距、林带宽等林带结构基本信息(表 1)。林带长度为固定值60 m。



图 1 单株模型树

Fig. 1 Individual model tree

表 1 防护林林带信息

Table 1 Protective forest belt information

林带编号	行数	棵数	枝下比例	株行距/(m×m)	林带宽/m
1	2	30	0.167	4×4	8
2	3	45	0.113	4×4	12
3	4	58	0.102	4×4	15
4	5	73	0.096	4×4	20
5	3	32	0.148	6×6	16
6	3	23	0.208	8×8	20
7	3	45	0.159	4×6	16
8	3	29	0.192	6×8	20

1.2 林带疏透度数字化测定方法

1.2.1 *林带疏透度定义* 疏透度是指林带林缘垂直面上透光孔隙的投影面积 S' 与该垂直面上林带投影总面积 S 之比，又称透光疏透度[17]。通常用 β 来表示疏透度。林带疏透度是以林带结构来鉴定其透风状况的指标，也是林带结构的重要判断参数[18]。疏透度的表达式如下。

$$\beta=\frac{S'}{S}\times 100\% \quad (1)$$

1.2.2 *疏透度计算方法* 疏透度在图像空间上表示为像素比，即透光孔隙的像素个数与投影总面积的像素个数的比值[19-20]。利用图像处理技术，则林带疏透度 β 的计算公式为：

$$\beta=\frac{S'}{S}\times 100\%$$
$$=\frac{p\sum_{(x,y)\in A'}1}{p\sum_{(x,y)\in A}1}\times 100\%$$
$$=\frac{\sum_{(x,y)\in A'}1}{\sum_{(x,y)\in A}1}\times 100\% \qquad (2)$$

式中:β 为疏透度;p 为单位像素的面积;A' 为透光孔隙区域;A 为林带投影总区域。因为同一幅数字图像中单位像素所代表的面积相同,则可以利用像素统计的方法计算分割的二值图像中透光孔隙区域的像素个数 $\sum_{(x,y)\in S'}1$ 与林带投影总区域的像素 $\sum_{(x,y)\in A}1$,即可以求得其比值。该比值就是林带疏透度 β。

1.3　疏透度测定

1.3.1　边框裁剪　由单株树模型可知,获得的林带样本背景即白色背景板部分占有很大的面积,在进行图像处理时,为精确获得在垂直面上林带投影总区域,先对获得的林带图像的边框进行裁剪,获得的图像边框紧贴林带边缘的二维图像[21]。边框裁剪后的图像见图 2。



图 2　裁剪边框后的图像

Fig. 2　Cropped image after

1.3.2　图像灰度化　由数码相机得到的图像为彩色图像即(RGB 图像),需将其灰度化。以高度为 10 cm,行数为 3 行,株行距为 6 cm×6 cm,林带宽度为 16 cm 的模型林带为例,林带模型原图见图 3。在图像处理中,将彩色图象转化为灰度化后,可以得到防风林带灰度图像的统计直方图(图 4)。



图 3　林带模型原图

Fig. 3　Original image of forest belt model

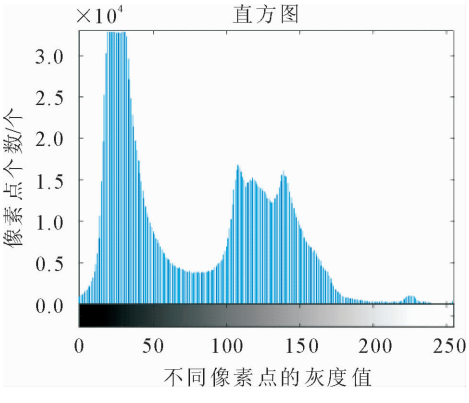


图 4　灰度图像的统计直方图

Fig. 4　Statistical histogram of grayscale image

由灰度图像的统计直方图可知,灰度图像呈现明显的双峰性。左侧峰对应的是灰度值较低的林带区域,右侧峰对应的灰度值较高的背景区域,可以看出,右侧峰有少许的分裂现象,左侧缝与右侧峰之前的区域分割不明显,这主要是由于在采集图像的过程中,没有能够完全避免光照影响,存在阴影现象的出现。

1.3.3　图像分割　图像分割是指将图像中的研究目标从背景区域分割出来[22]。本研究就是将垂直面上的透光区域从垂直面上的林带投影总区域分割出来,以便于能够利用像素统计方法,求解林带疏透度 β。

根据灰度图像的统计直方图,可以使用 Otsu 法(最佳全局阈值分割法)分割防风林林带图像[23-26]。Otsu 法也称最大类间方差法或大津法,是由 Nobuyuki otsu(大津展之)提出的一种自动计算阈值对灰度图像进行二值化的方法。Otsu 方法的原理是:该算法假设一幅图像由物体和背景两部分组成,则该图像包括物体像素和背景像素,直方图表现为双峰直方图。通过统计学的方法来选取某一阈值,将物体色与背景色尽可能的分割开。该阈值的衡量标准为:当该阈值使物体和背景之间的类间方差越大,即为分割阈值时,物体与背景的分割效果越好。

对于图像 $I(x,y)$,图像的大小为 $M\times N$。设物体与背景的分割阈值为 T,图像 I 中像素个数小于分割阈值 T 的像素个数为 X_0,大于分割阈值 T 的

像素个数为 X_1。设物体占整个图像 I 的比例为 p_0，平均灰度为 u_0，背景占整个图像 I 的比例为 p_1，平均灰度为 u_1；图像 I 的总平均灰度记为 u，类间方差设为 g。则

$$p_0=\frac{X_0}{M\times N} \tag{3}$$

$$p_1=\frac{X_1}{M\times N} \tag{4}$$

$$u=p_0\times u_0+p_1\times u_1 \tag{5}$$

$$g=p_0\times(u_0-u)^2+p_1\times(u_1-u)^2$$
$$=p_0\times p_1\times(u_0-u_1)^2 \tag{6}$$

当类间方差 g 达到最大时，即为物体与背景之间的分割阈值 T。

利用 Otsu 方法进行最佳全局阈值处理后，得到分割后的二值图像。在分割后的二值图像中，透光区域即背景区域仍然存在部分噪声，采用图像处理中的 bwareaopen()方法，除去林带二值图像中的噪音。去噪后的图像见图 5。

1.1.4 *疏透度计算* 二值图像是指每个像素不是黑就是白，灰度值没有中间过渡的图像，像素点的值只有 0 和 1。其中，像素值 1 表示白色，像素值 0 表示黑色。二值化后的图像见上图 5。根据公式(2)，A'为透光孔隙区域，即二值图像中像素值为 1 的像素点的总个数 c；A 为林带投影总区域，即整个二值图像像素点的总个数 sum。则林带疏透度的公式可以表述为下式。

$$\beta=\frac{c}{sum}=\frac{c}{m\times n} \tag{7}$$

经计算，求得以高度为 10 cm，行数为 3 行，株行距为 66，林带宽度为 16 cm 的模型林带的疏透度 $\beta=0.445\ 8$。

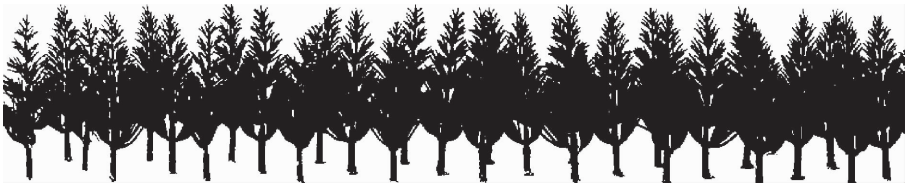


图 5 去除噪声后的图像

Fig. 5 Image after noise removal

2 结果与分析

2.1 试验结果及分析

本试验对表 1 的 8 种结构林带分别采用数字图像处理技术和 Photoshop 图像处理软件计算同一种结构林带的疏透度，这样便能够得到 2 组林带疏透度的数据，共计 2 组 8 个测量数据(表 2)。

表 2 林带无叶期疏透度测量结果

Table 2 Forest belt without leaf stage clearance measurement results

林带编号	Matlab 测量疏透度结果	Photoshop 测量疏透度结果
1	0.303 7	0.271 2
2	0.176 4	0.180 1
3	0.132 3	0.116 8
4	0.129 6	0.135 7
5	0.445 8	0.466 7
6	0.510 6	0.501 1
7	0.335 9	0.347 9
8	0.431 5	0.437 9

在拍摄林带图像时，人为因素或自然因素可能导致投影误差或背景误差的产生。所以，对使用 matlab 图像处理技术及 Photoshop 处理图像的测定结果进行单因素方差分析及 F 检验，以便于验证系统自身的误差是否影响测定林带疏透度的结果。

由表 3 可知：matlab 和 Photoshop 的全部测定值的离散程度为 0.320 996；matlab 和 Photoshop 测定结果的各组平均值与 2 组测定结果总平均值的误差平方和为 0.000 004 4，表明各组的测量值与总体均值差别不大；各个测定值与其组平均值误差的平方和为 0.320 996，说明 matlab 与 Photoshop 的各个测定结果与其组测定的平均值存在一定程度的差异性。组间均方 MSA 为0.000 004 4，组内均方 MSE 为 0.022 928。取 $\alpha=0.05$，$F=0.000\ 19<F_{0.05}(1,14)=4.600\ 1$，则说明使用 matlad 图像处理工具与使用 Photoshop 处理数据的结果没有显著性差异，本研究方法能较为准确测量林带疏透度 β，分析结果见表 3。

表 3 方差分析

Table 3 Variance analysis table

差异源	*SS*	*MS*	*F*	*P*-value	Fcrit
组间	0.000 004 4	0.000 004 4	0.000 192	0.989 13	4.600 11
组内	0.320 991	0.022 928			
总计	0.320 996				

2.2 林带疏透度与林带结构因子模型

对采用数字图像处理技术计算出的林带疏透度与林带结构因子之间采用相关性分析与逐步回归法

建立关系模型。根据获取的 8 种结构林带的样本,以林带疏透度为因变量,林带结构因子:行数(N)、棵数(M)、枝下比例(D)、树冠比例(U)、株行距(Q)、林带宽(W)和密度(ρ)为自变量,进行计算统计(表 4)。

计算行数、棵数、枝下比例、株行距、林带宽、密度与防风林林带疏透度之间的相关系数。可见疏透度与林带结构因子相关性系数表(表 5)。

表 4　防风林林带样本

Table 4　Windbreak forest sample table

林带编号	行数	棵数	枝下比例	株行距/mm	林带宽/m	密度/(棵·m^{-2})	疏透度
1	2	30	0.167	4×4	8	6.250×10^{-2}	0.303 7
2	3	45	0.113	4×4	12	6.250×10^{-2}	0.176 4
3	4	58	0.102	4×4	15	6.444×10^{-2}	0.132 3
4	5	73	0.096	4×4	20	6.083×10^{-2}	0.129 6
5	3	32	0.148	6×6	16	3.333×10^{-2}	0.445 8
6	3	23	0.208	8×8	20	1.917×10^{-2}	0.510 6
7	3	45	0.159	4×6	16	4.688×10^{-2}	0.335 9
8	3	29	0.192	6×8	20	2.417×10^{-2}	0.431 5

表 5　疏透度与林带结构因子相关性系数

Table 5　Correlation coefficient between correlation degree and forest structure factor

林带结构因子	行数	棵数	枝下比例	株行距	林带宽	密度
疏透度	−0.570 5	−0.871 6	0.916 7	0.871 3	0.296 0	−0.918 0

由表 5 可以看出,仿真林林带疏透度与林带的结构因子枝下比例和株行距存在明显正相关,与行数、棵数和密度显著负相关。剔除相关性低的因子,选取相关性系数较高的林带结构因子:行数、棵数、枝下比例、株行距和密度 5 个林带结构因子进行逐步回归分析,得到林带疏透度的回归方程:

$$\beta=-0.060\ 1N-0.065\ 8\rho+0.810\ 9\quad(R^2=0.961\ 3,p=0.000\ 29) \tag{7}$$

为验证模型的可靠性,对得出的林带疏透度的回归方程进行分析。根据林带疏透度的回归方程,可以分别得到 8 种不同林带的模拟值。表 6 为模拟值与实测值。

表 6　林带疏透度模拟值与实测值对比

Table 6　Comparison of simulated and measured values of forest belt reliability

疏透度	林带编号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
实测值	0.303 7	0.176 4	0.132 3	0.129 6	0.445 8	0.510 6	0.335 9	0.431 5
模拟值	0.279 5	0.219 4	0.146 5	0.110 1	0.411 3	0.504 5	0.322 1	0.471 6

根据林带疏透度模拟值与实测值的统计结果(表 6)。可用 matlab 处理软件做出林带疏透度模拟值与实测值的图像(图 6)。可以得出两者的值相当的吻合。所以,落叶松林带疏透度与防风林林带的行数、密度之间的线性关系成立,且拟合度为 0.961 3。

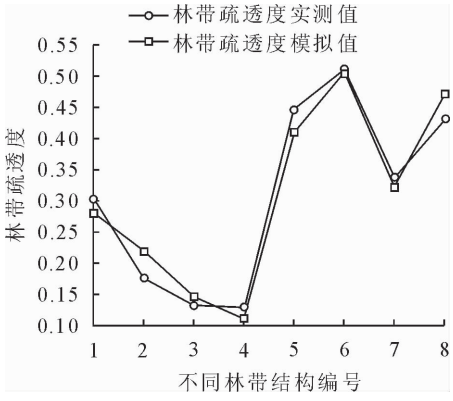


图 6　林带疏透度模拟值与实测值对照

Fig. 6　Forest belt clearance degree simulation value and measured value comparison chart

3　结论与讨论

3.1　结论

采用“图像处理技术”与“数码相机”相结合的方法对防风林林带疏透度进行数字化测定。与以往测定方法相比,一定程度上避免了人为因素的干扰,该方法操作简单,能够快速准确地测量防风林林带的疏透度。

通过相关性分析的方法,将防风林的林带疏透度和各个林带结构因子进行相关性分析,得到了防风林林带疏透度与防风林行数、棵数、枝下比例、株

行距、林带宽、密度间的相关系数。剔除相关系数低的林带结构因子，通过逐步线性回归的方法，得到针叶林防风林林带疏透度与林带行数、密度的关系模型表达式为：$\beta=-0.060\ 1N-0.065\ 8\ \rho+0.810\ 9$（$R^2=0.961\ 3$，$P=0.000\ 29$）。可根据该表达式对防风林林带结构进行调整，以便于能够达到理想的防风效果。

3.2 讨论

采用的是数码相机与图像处理技术相结合的方法来数字化测定防风林带疏透度。传统方法大多使用图像处理软件 Photoshop 来计算林带疏透度，该方法在计算疏透度时，需要大量的人工操作，主要依靠肉眼来判断林带区域与背景区域，不可避免会产生人为误差，操作繁琐且缓慢。本研究方法能够避免人为因素的干扰，能智能化地测定林带疏透度。另外，因为数码相机获取图像的像素点相对于普通相机远远要多。所以，在获取防风林带图像时，使用数码相机在一定程度上降低令系统误差的发生。

本研究提出的方法虽然能够自动化识别林带区域与林带孔隙区域，实现智能化、数字化测定林带疏透度。但图像处理技术在对图像进行分割时，由于获取的防风林带照片会受到光照条件的影响，枝干的少数部分会被分割为背景区域，即被当作孔隙区域，所以利用该方法获得的林带疏透度会比实际的林带疏透度略大。

疏透度是林带结构因子的综合表征，与林带结构因子相关。通过相关性分析及逐步回归建立了疏透度与防风林行数、密度之间的关系模型。这与万猛等[5]对克玛依地区的农田防护林的研究结果一致；曹新孙[17]指出：造林密度（株行距）、林带宽度（行数）和树种组成以及搭配方式直接影响着疏透度的大小。本试验采用的是固定的“品字形”布设的落叶松，可见研究结果与其一致。

由于试验数据均来自于人工观测，工作量大，耗时耗力。但如果采用多分辨率、多尺度和连续观测的遥感技术获取林带结构因子信息，便可降低风洞实验成本，为防风林防风效应研究提供极大的便利。

参考文献：

[1] 郭学斌，梁爱军，郭晋平，等. 晋北风沙特点、防风林带结构及效益[J]. 水土保持学报，2011，25(6)：44-54.

[2] 付亚星，王乐，彭帅，等. 河北坝上农田防护林防风效能及类型配置研究—以河北省康保县为例[J]. 水土保持研究，2014，21(3)：279-283.
FU Y X，WANG L，PENG S，*et al*. Research on windproof efficiency and type configuration of farmland shelterbelt in Bashang Region of Hebei Province——Taking kangbao county as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation，2014，21(3)：279-283. (in Chinese)

[3] 杨雨春，杨洪香，赵珊珊，等. 水田防护林疏透度及其影响因子分析[J]. 林业工程学报，2014，28(3)：18-21.
YANG Y C，YANG H X，ZHAO S S，*et al*. Porosity and its impact factors in the paddyfield shelterbelt in the western Jilin Province[J]. Journal of Forestry Engineering，2014，28(3)：18-21. (in Chinese)

[4] 李永平，冯永忠，杨改河. 北方旱区农田防护林防风效应研究[J]. 西北农林科技大学学报：自然科学版，2009，37(6)：92-9.
LI Y P，FENG Y Z，YANG G H. Study on windbreak effect of farmland shelterbelts in dry farmlands of north China[J]. Journal of Northwest A & F University：Natural Science Edition，2009，37(6)：92-9. (in Chinese)

[5] 万猛，潘存德，王梅. 晋瑜农田防护林林带疏透度数字化测定[J]. 干旱区地理. 2005，28(1)：120-124.

[6] 牛庆花，彭博，陆贵巧，等. 河北省坝上地区牧场防护林的防风效能研究[J]. 水土保持通报，2018，38(4)：114-117.
NIU Q H，PENG B，LU Q G，*et al*. Windbreak efficiency of pasture shelterbelt in Bashang Area of Hebei Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2018，38(4)：114-117. (in Chinese)

[7] FAN Z P，GUAN W B，JIANG F Q，*et al*. Construction history and actuality of windbreaks/shelterbelts artificial ecoengineering[J]. Soil Water Conservation，2000，14(5)：49-54.

[8] 封斌，高保山，麻保林，等. 陕北榆林风沙区农田防护林结构配置与效益研究[J]. 西北林学院学报，2005，20(1)：118-124.
FENG B，GAO B S，MA B L，*et al*. Shelter structure and effect of farmland shelterbelt in sand-drift area in Yulin[J]. Journal of Northwest Forestry University，2005，20(1)：118-124. (in Chinese)

[9] KENNY W A. A method for estimating windbreak porosity using digitized photographicsilhouettes[J]. Agric Meteorol，1987，39：91-94.

[10] 关文彬，李春平，李世锋，等. 林带疏透度数字化测度方法的改进及其应用研究[J]. 应用生态学报，2002，13(6)：651-657.

[11] 李素莉，杨军，马履一，等. 北京市交通干道防护林带内 PM(2.5)浓度变化特征[J]. 西北林学院学报，2015，30(3)：245-252.
LI S L，YANG J，MA L Y，*et al*. Variations of PM2.5 concentrations inside the greenbelts along two urban traffic arteriesin Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University，2015，30(3)：245-252. (in Chinese)

[12] 杨雨春，赵珊珊，包广道，王君，张忠辉. 吉林水田防护林防风效能及其影响因子分析[J]. 西北林学院学报，2015，30(1)：132-136.
YANG Y C，ZHAO S S，BAO G D，*et al*. Effectiveness of windbreak forest in fields and influencing factors in west Jilin Province[J]. Journal of Northwest Forestry University，2015，30(1)：132-136. (in Chinese)

[13] 徐满厚，刘彤，孙饮明. 绿洲-荒漠过渡带防风固沙林疏透度的数字化测定及应用[J]. 石河子大学学报(自然科学版)，2011，29(4)：230-235.

[14] 周杰，雷加强，孙琳，等. Image-ProPlus 数字图像分析软件计算防护林疏透度的可行性分析[J]. 干旱区资源与环境，2015，

29(12):109-114.
ZHOU J,LEI J Q,SUN L,*et al*. The feasibility analysis of Image-pro Plus in calculating the optical porosity of windbreaks[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2015,29(12):109-114. (in Chinese)

[15] 陈佳悦,姚霞,黄芬,等. 基于图像处理的冬小麦氮素监测模型[J]. 农业工程学报,2016,32(4):163-170.
CHEN J Y,YAO X,HUANG F,*et al*. N status monitoring model in winter wheat based on image processing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(4):163-170. (in Chinese)

[16] 刘洪见,郑丽敏,曾爱平. 图像处理技术在提取玉米图像骨架上的应用[J]. 农业网络信息,2007(1):18-20.

[17] 曹新孙. 农田防护林学[M]. 北京:中国林业出版社,1983:100-109.

[18] 唐朝胜. 海南橡胶防护林防风效果数值模拟研究[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2009:17-19.

[19] 李冠林,马占鸿,王海光. 基于图像处理的葡萄霜霉病单叶严重度自动分级方法[J]. 中国农业大学学报,2011,16(6):88-93.
LI G L,MA Z H,WANG H G. An automatic grading method of severity of single leaf infected with grape downy mildew based on image processing[J]. Journal of China Agricultural University,2011,16(6):88-93. (in Chinese)

[20] 关辉,张长利,张春媛. 基于图像处理的黄瓜叶片病斑分级方法的研究[J]. 农机化研究,2010,32(3):94-97.

[21] 陈占良,张长利,沈维政,等. 基于图像处理的叶斑病分级方法的研究[J]. 农机化研究,2008(11):73-80.

[22] 胡春华,李萍萍. 基于图像处理的黄瓜缺氮与缺镁判别的研究[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2004,25(1):10-12.

[23] 赵书兰. MATLAB R2008 数字图像处理与分析实例教程[M]. 北京:化学工业出版社,2009.

[24] 刘健庄,栗文青. 灰度图象的二维 Otsu 自动阈值分割法[J]. 自动化学报,1993,19(1):101-105.

[25] 朱良宽,刘亮,东旭,等. 基于 DSP 的林木冠层图像采集与处理系统[J]. 森林工程,2018,34(1):60-64.
ZHU L K,LIU L,DONG X,*et al*. Forest canopy image acquisition and processing system based on DSP[J]. Forest Engineering,2018,34(1):60-64. (in Chinese)

[26] GONZALEZ R C,WOODS R E. 数字图像处理(MATLAB 版)[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2014:216-222.

[27] 郎春博,贾鹤鸣,邢致恺,等. 基于改进粒子群算法的植物冠层图像分割[J]. 森林工程,2019,35(1):47-52.
LANG C B,JIA H M,XING Z K,*et al*. Multi threshold segmentation of plant canopy image based on improved particle swarm optimization[J]. Forest Engineering,2019,35(1):47-52. (in Chinese)

(上接第 217 页)

[16] HUI G,YE W,ZHANG G,*et al*. A novel approach for assessing the neighborhood competition in two different aged forests[J]. Forest Ecology & Management,2018,422:49-58. (in Chinese)

[17] 金星姬,贾炜玮,李凤日. 基于 BP 人工神经网络的兴安落叶松天然林全林分生长模型的研究[J]. 植物研究,2008,28(3):370-374.
JIN X J,JIA W W,LI F R. Whole stand growth model for natural dahurian larch forests based on BP ANN[J]. Bulletin of Botanical Research,2008,28(3):370-374. (in Chinese)

[18] 胥辉,全宏波,王斌. 思茅松标准树高曲线的研究[J]. 西南林业大学学报:自然科学版,2000,20(2):74-77.

[19] 刘卫国. MATLAB 程序设计与应用[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2006.

[20] 王轶夫,孙玉军,郭孝玉. 基于 BP 神经网络的马尾松立木生物量模型研究[J]. 北京林业大学学报,2013,35(2):17-21.
WANG Y F,SUN Y J,GUO X Y. Single-tree biomass modeling of *Pinus massoniana* basedon BP neural network[J]. Journal of Beijing Forestry University,2013,35(2):17-21. (in Chinese)

[21] 王明亮,唐守正. 标准树高曲线的研制[J]. 林业科学研究,1997,10(3):259-264.

[22] 赵俊卉,亢新刚,张慧东,等. 长白山 3 个主要针叶树种的标准树高曲线[J]. 林业科学,2010,46(10):191-194.

[23] 吕飞舟,石程远,朱光玉,等. 基于冠幅比数的次生林林木分级研究[J]. 西北林学院学报,2016,31(3):211-214.
LÜ F Z,SHI C Y,ZHU G Y,*et al*. Classification of the secondary forest based on crown comparison index[J]. Journal of Northwest Forestry University,2016,31(3):211-214. (in Chinese)