

# 基于多元统计分析的永寿县刺槐人工林健康评价研究

张顺祥,刘金良,赵 忠\*

(西北农林科技大学 西部环境与生态教育部重点实验室,陕西 杨陵 712100)

**摘 要:**为了调查陕西省永寿县刺槐人工林的健康状况,以及建立更加客观、科学的森林健康评价体系,在永寿县布设 45 块刺槐人工林样地并调查,采用主成分分析和聚类分析评价刺槐样地健康状况,并采用判别分析对健康评价结果进行检验。结果表明,研究区刺槐人工林中健康林分占 33.33%,亚健康占 64.44%,不健康占 2.22%,判别分析和聚类分析的结果具有较好的一致性。研究区内人工林需要进行疏伐等经营措施提高林分健康水平,且主成分分析和聚类分析相结合的方法能够用于森林健康评价中,且更具有科学性、客观性。

**关键词:**刺槐;健康评价;主成分分析;聚类分析;判别分析

**中图分类号:**S792.27      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2016)02-0109-06

## Health Assessment on Black Locust Plantations in Yongshou County Based on Multivariate Statistical Analysis

ZHANG Shun-xiang, LIU Jin-liang, ZHAO Zhong\*

(Key Laboratory of Environment and Ecology in Western China, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to investigate the health conditions of black locust (*Robinia pseudoacacia*) plantations in Yongshou County and to establish a more scientific and more subjective forest evaluation system, 45 plots were set and surveyed. Principal component analysis and cluster analysis were adopted to assess the health status of each plot, and discriminant analysis was used to test the result. It was found that the percentage of healthy, sub-healthy and unhealthy plantations in surveyed areas were 33.33%, 64.44%, and 2.22%, respectively, and the result of discriminant analysis agreed with that of cluster analysis. Measures, including thinning, should be taken to improve the forest health status in study area. The combination of principal component analysis and cluster analysis was effective way for health assessment, and it was more scientific and more objective.

**Key words:** black locust; health assessment; principal component analysis; cluster analysis; discriminant analysis

森林健康现在已经成为林学研究的热点问题之一。综合多位学者<sup>[1-6]</sup>对森林健康涵义的认识,可以认为森林健康是这样一种状态:在森林病虫害、火灾、人为经营抚育等非生物因素以及各种生物因素的影响下,森林在能够维持其自身生态系统的稳定性、多样性的同时,又能够持续不断地满足人类对林

业的自然、经济以及社会的需求。

其中,评价方法是森林健康研究的核心内容之一。森林健康评价方法中应用较多的方法是层次分析法、健康距离法、主成分分析法、人工神经网络法、灰色关联度法、指示物种法等<sup>[3-4,7-8]</sup>,这些方法大多单独使用。评价方法的选择对森林健康评价至关重

收稿日期:2015-05-29 修回日期:2015-08-08

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目“黄土高原人工林可持续经营技术与示范”(2012BAD22B0302)。

作者简介:张顺祥,男,在读硕士,研究方向:森林培育。E-mail:zhangshunxiang@foxmail.com

\* 通信作者:赵 忠,男,教授,博士生导师,研究方向:森林培育。E-mail:zhaozh@nwsuaf.edu.cn

要,不同的评价方法决定了森林健康评价结果的精确度。不同的评价方法各有其优缺点,目前森林健康评价越来越呈现出多种方法相结合的趋势。本研究中将采用主成分分析法、聚类分析法和判别分析相结合的方法。主成分分析是利用降维的思想,用数量较少的主成分来代替将数量较多的指标,主成分保留了原始变量的大部分信息,且互不相关,能够使复杂问题简单化;聚类分析是基于样品或者指标的特性的相似性,不需要事先制定分类标准,从而对样品或者指标进行分类的一种方法;判别分析是判别样品或者指标所属类型的一种方法,如已知有多个类型,据样品的属性特征判断其属于何种类型;聚类与判别通常连用,一般先进行聚类分析,再进行判别分析<sup>[9-10]</sup>。

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)耐干旱、耐贫瘠,生长速度快,容易成林,是渭北黄土高原地区主要造林树种之一,在该区域发挥着重要的水土保持作用<sup>[11]</sup>。目前该区域刺槐人工林存在许多问题,例如更新状况较差、栽植密度过大、缺乏抚育等,这些严重影响了刺槐林的生态功能的发挥<sup>[12]</sup>。本研究以陕西省永寿县的刺槐林为对象,在科学选择健康评价指标的基础上,建立起基于主成分分析、聚类分析和判别分析的健康综合评价体系,可以更加科学、客观地对人工林进行健康评价。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省永寿县(简称YS),该地地处渭北黄土高原,经纬度 34°29′-34°59′N、107°56′-108°20′E,海拔 1 116~1 276 m,暖温带大陆性气候区,年平均气温 10.8°,≥10℃ 积温 3 470.3℃,年均无霜期 210~216 d,年均降水量 601.6 mm,主要土壤类型为褐土和黑垆土等。人工林多以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platyclusus orientalis*)为主;灌木植物以黄蔷薇(*Rosa hugonis*)、酸枣(*Ziziphus jujuba*)等为主;草本植物以鹅观草(*Roegneria kamoji*)、茜草(*Rubia cordifolia*)、羊茅(*Festuca ovina*)等为主。

1.2 样地调查方法

2009 年 7-9 月在陕西省永寿县槐坪林场设置刺槐人工林样地 21 块,2012 年 7-9 月又在该县马莲滩地区设置样地 24 块,样地规格均为 20 m×20 m。调查并记录每块刺槐样地的经纬度、海拔、坡度、坡向、坡位等生境信息;调查各样地的林龄、郁闭度、胸径、树高、枯梢比、幼苗更新数、病虫害程度等;

调查灌木的种类、数量及高度;同时要获取研究地区的降水量、气温、风速等气象资料(表 1)。

1.3 刺槐林健康指标体系的建立

指标体系的建立是森林健康评价的首要步骤,结合前人<sup>[2,13]</sup>研究成果,根据研究区刺槐林林地的实际情况,最终初步确定了 8 个评价指标,由此构建永寿县刺槐人工林健康评价指标体系(表 2)。

其中立地质量的赋值标准是优良赋值为 0.9,合格 0.6,差 0.3。

1.4 健康评价模型的构建

本研究的健康评价模型由采用主成分分析法、聚类分析法和判别分析法三者综合而成<sup>[9-10,14-15]</sup>;对各个样地的指标数据进行主成分分析,根据主成分分析后所确定的主成分表达式计算各个样地的每个主成分的得分值;再根据每个样地的主成分得分进行聚类分析,初步得到每块样地的健康状况分类;同时基于各主成分得分值建立判别函数,利用判别函数对样地进行归类,通过归类结果对聚类分析结果进行评判。

具体步骤为:1)将每块样地的  $n$  个指标通过主成分分析将指标变量  $ZX_i$  ( $ZX_i$  是指标的标准化值,数据标准化方式为 Z-score 法)综合成  $m$  个变量( $m < n$ )个变量( $f_1, f_2, \dots, f_m$ ),这  $m$  个变量之间互不相关, $f_1, f_2, \dots, f_m$  分别称为原始指标的第 1、第 2、...第  $m$  主成分,其数学表达式为:

$$\begin{cases} f_1 = a_{11}ZX_1 + a_{12}ZX_2 + \dots + a_{1p}ZX_p \\ f_2 = a_{21}ZX_1 + a_{22}ZX_2 + \dots + a_{2p}ZX_p \\ \dots\dots\dots \\ f_m = a_{m1}ZX_1 + a_{m2}ZX_2 + \dots + a_{mp}ZX_p \end{cases}$$

2)根据主成分表达式计算每块样地的各个主成分得分  $f_m$ 。

3)采用 K 均值聚类和欧氏距离平方对各个样品的各主成分得分进行聚类分析。

4)以每块样地的各主成分得分为基础建立判别函数,将每个主成分得分值  $f_1, f_2, \dots, f_m$  分别带入判别函数  $g_k$  ( $k$  为判别分析中样本的分类数),求得函数  $g_k$  的数值并比较其大小,最大值函数  $g_k$  表明该样本属于第  $k$  组。判别函数的表达式如下:

$$\begin{cases} g_1 = b_{01} + b_{11}f_1 + b_{21}f_2 + \dots + b_{p1}f_p \\ g_2 = b_{02} + b_{12}f_1 + b_{22}f_2 + \dots + b_{p2}f_p \\ \dots\dots\dots \\ g_k = b_{0k} + b_{1k}f_1 + b_{2k}f_2 + \dots + b_{pk}f_p \end{cases}$$

数据分析计算采用 Excel 2007 和 SPSS 20.0 进行。

表 1 永寿刺槐人工林调查数据

Table 1 Data of black locust in Yongshou

样地 编号	立地 质量	枯梢比/%	更新 /(株·hm <sup>-2</sup> )	郁闭度	密度 /(株·hm <sup>-2</sup> )	平均胸径 /cm	平均树高 /m	病虫害程度 /%
YS1	优良	19	0	0.92	300	24.57	16.61	19
YS2	优良	0	0	0.85	2 275	3.69	4.49	0
YS3	合格	21	0	0.78	1 050	12.48	9.31	21
YS4	合格	1	0	0.88	2 325	5.67	6.54	1
YS5	合格	0	0	0.85	2 175	5.56	6.76	0
YS6	优良	0	0	0.88	2 425	6.02	6.95	0
YS7	优良	11	0	0.74	1 775	9.22	10.63	11
YS8	优良	12	0	0.79	1 475	11.07	12.07	12
YS9	优良	8	0	0.69	1 525	11.19	12.37	8
YS10	优良	16	0	0.83	1 150	12.88	14.63	16
YS11	优良	12	0	0.70	1 850	9.58	11.34	12
YS12	优良	21	0	0.71	2 025	8.53	11.45	21
YS13	优良	27	0	0.72	900	17.84	12.60	27
YS14	优良	43	0	0.75	850	17.31	11.79	43
YS15	优良	29	0	0.62	1 100	13.83	11.32	29
YS16	优良	31	0	0.68	875	14.34	11.73	31
YS17	优良	17	0	0.65	1 300	16.28	12.13	17
YS18	差	0	0	0.86	2 175	5.16	5.44	0
YS19	合格	0	0	0.80	2 075	5.22	5.94	0
YS20	优良	7	0	0.82	350	24.51	15.32	7
YS21	优良	9	0	0.62	775	17.14	12.70	9
YS22	差	1	100	0.80	2 752	6.47	7.19	1
YS23	合格	1	75	0.85	2 075	8.87	8.24	1
YS24	合格	3	125	0.80	2 150	7.09	6.81	1
YS25	差	4	125	0.70	2 400	6.58	6.25	1
YS26	差	2	75	0.75	1 625	8.82	8.07	1
YS27	差	3	100	0.74	1 125	8.06	7.71	1
YS28	差	3	100	0.77	2 575	9.04	8.36	1
YS29	差	2	50	0.75	1 600	6.99	7.44	1
YS30	合格	7	125	0.75	2 350	8.80	8.58	1
YS31	合格	6	150	0.75	1 825	8.88	8.14	1
YS32	合格	4	0	0.76	2 025	9.53	8.44	1
YS33	合格	11	25	0.80	2 300	9.34	8.24	1
YS34	差	3	50	0.86	2 650	8.70	8.90	1
YS35	合格	6	50	0.80	1 255	12.60	10.17	1
YS36	合格	6	75	0.80	1 400	8.22	7.88	1
YS37	合格	3	125	0.73	1 325	11.12	10.02	1
YS38	合格	1	325	0.85	2 075	8.87	8.24	1
YS39	差	4	25	0.65	3 200	6.77	7.99	1
YS40	差	2	0	0.90	1 400	8.67	7.98	1
YS41	差	9	0	0.82	3 000	7.98	6.83	1
YS42	合格	6	0	0.92	3 100	10.69	9.20	1
YS43	差	4	1 200	0.83	2 200	7.41	7.31	1
YS44	差	1	0	0.50	2 000	6.18	5.06	1
YS45	差	2	0	0.30	1 000	6.67	5.68	1

表 2 刺槐人工林健康评价指标体系

Table 2 Health assessment indicator system of black locust	
指标	
刺槐人工林健康评价指标体系	立地质量( $X_1$ )
	枯枝比( $X_2$ )
	更新( $X_3$ )
	郁闭度( $X_4$ )
	密度( $X_5$ )
	平均胸径( $X_6$ )
	平均树高( $X_7$ )
	病虫害( $X_8$ )

2 结果与分析

2.1 主成分分析

从表 3 可以看出,前 3 个主成分的累计贡献率 >80%,可以认为前 3 个主成分代表了原始数据的大部分信息。

当某一指标在某一主成分上的因子载荷值的绝对值最大时,则该主成分包含了该指标的绝大部分信息,即该指标与该主成分相关程度最高。进一步

分析已筛选出的 3 个主成分与 8 个指标的关系,得到表 4,由表 4 可知立地质量、枯枝比、平均胸径、平均树高、病虫害和第 1 主成分呈正相关关系,密度和第 1 主成分呈负相关关系;郁闭度和第 2 主成分呈正相关关系;病虫害和第 3 主成分呈正相关关系。

表 3 主成分的特征根和贡献率

Table 3 Characteristic root and contribution rate of principal components			
成份	特征值		
	合计	方差的/%	累积/%
1	4.336	54.199	54.199
2	1.234	15.424	69.623
3	0.956	11.950	81.573

根据表 3 和表 4,进一步可以求得主成分数学表达式,3 个表达式依次是:

$$f_1 = 0.360ZX_1 + 0.414ZX_2 - 0.136ZX_3 - 0.048ZX_4 - 0.369ZX_5 - 0.421ZX_6 + 0.429ZX_7 + 0.425ZX_8 \tag{1}$$

$$f_2 = 0.349ZX_1 - 0.117ZX_2 + 0.212ZX_3 + 0.850ZX_4 + 0.194ZX_5 + 0.103ZX_6 + 0.178ZX_7 - 0.130ZX_8 \tag{2}$$

$$f_3 = -0.225ZX_1 + 0.065ZX_2 + 0.934ZX_3 - 0.109ZX_4 - 0.190ZX_5 + 0.140ZX_6 + 0.060ZX_7 +$$

表 5 各样地的主成分得分

Table 5 PCA scores of each plot											
样地编号	主成分得分			样地编号	主成分得分			样地编号	主成分得分		
	$f_1$	$f_2$	$f_3$		$f_1$	$f_2$	$f_3$		$f_1$	$f_2$	$f_3$
YS1	4.576	1.623	0.396	YS16	3.703	-0.884	0.196	YS31	-0.687	0.026	0.333
YS2	-1.790	0.862	-1.175	YS17	2.557	-0.582	0.021	YS32	-0.666	0.043	-0.477
YS3	1.789	-0.409	0.079	YS18	-2.257	0.232	-0.595	YS33	-0.594	0.350	-0.427
YS4	-1.647	0.869	-0.853	YS19	-1.699	0.167	-0.746	YS34	-1.518	0.671	-0.264
YS5	-1.616	0.635	-0.794	YS20	3.382	1.087	0.316	YS35	0.314	0.348	0.088
YS6	-1.290	1.341	-1.121	YS21	2.339	-0.702	0.140	YS36	-0.531	0.173	-0.007
YS7	0.891	0.130	-0.509	YS22	-2.134	0.165	-0.097	YS37	-0.034	-0.086	0.448
YS8	1.501	0.537	-0.379	YS23	-1.005	0.837	-0.244	YS38	-1.189	1.125	1.021
YS9	1.239	-0.091	-0.329	YS24	-1.356	0.379	-0.033	YS39	-1.970	-0.920	-0.404
YS10	2.548	0.857	-0.175	YS25	-1.932	-0.759	0.225	YS40	-1.032	0.528	-0.247
YS11	1.095	-0.126	-0.453	YS26	-1.113	-0.458	0.225	YS41	-1.774	0.184	-0.598
YS12	1.676	-0.240	-0.438	YS27	-0.947	-0.695	0.472	YS42	-0.988	1.608	-0.858
YS13	3.790	-0.340	0.230	YS28	-1.529	-0.005	0.096	YS43	-2.436	1.497	5.639
YS14	4.973	-0.584	0.361	YS29	-1.345	-0.575	0.037	YS44	-2.290	-2.972	0.087
YS15	3.334	-1.268	0.148	YS30	-0.840	0.156	0.078	YS45	-1.499	-4.733	0.586

2.3 判别分析

根据主成分得分表 5 和聚类分析结果表 6,进行判别分析以检验聚类分析结果的准确性。采用的判别方法是 Fisher 线性判别,可以得到判别函数的系数(表 7)。由此可得判别函数的表达式(4)、(5)、(6)。

$$g_1 = 4.720f_1 - 1.460f_2 - 5.452f_3 - 7.417 \tag{4}$$

$$0.047ZX_8 \tag{3}$$

其中, $ZX_i(i=1、2、3\cdots\cdots 8)$ 表示各指标  $X_i$  标准化后的数值。

表 4 8 个指标的因子载荷矩阵

指标	成份		
	1	2	3
立地质量 $X_1$	0.749	0.388	-0.220
枯枝比 $X_2$	0.863	-0.130	0.064
更新 $X_3$	-0.283	0.235	0.913
郁闭度 $X_4$	-0.100	0.944	-0.107
密度 $X_5$	-0.768	0.216	-0.186
平均胸径 $X_6$	0.876	0.114	0.137
平均树高 $X_7$	0.894	0.198	0.059
病虫害 $X_8$	0.885	-0.144	0.046

根据式(1)、式(2)、式(3)和原始数据标准化后的数据,可以计算各样地的 3 个主成分得分值(表 5)。

2.2 聚类分析

基于表 5 中的主成分分析结果,采用  $K$  均值聚类,聚类数量设为 3,进行聚类分析(表 6)。由表 6 可知,处于健康状态的样地有 15 块,处于亚健康状态的样地有 29 块,处于不健康状态的样地有 1 块。

$$g_2 = -1.885f_1 + 0.376f_2 + 1.127f_3 - 2.194 \tag{5}$$

$$g_3 = -16.148f_1 + 10.999f_2 + 49.086f_3 - 167.400 \tag{6}$$

将各个样地的主成分得分  $f_1、f_2、f_3$  分别代入判别函数表达式(4)、(5)、(6)中,可以得到各个样地的判别分类结果。结果显示,判别分析和聚类分析

对各个样地的健康状况评定结果完全一致,表明聚类分析结果是准确的,研究所采用的模型是可行的。判别分析和聚类分析的结果对比见表 8。

2.4 刺槐人工林健康状况分析

在 45 块调查样地中,处于健康状态的样地有

15 块,处于亚健康状态的样地有 29 块,处于不健康状态的样地有 1 块(图 1),即在永寿县中处于健康状态的林分占 33. 33%,亚健康占 64. 44%,不健康占 2. 22%,该地区刺槐人工林主要处于亚健康状态,整体健康状况不容乐观。

表 6 样地的聚类分析结果

Table 6 Cluster analysis result of plots

样地编号	分类	样地编号	分类	样地编号	分类	样地编号	分类	样地编号	分类
YS1	1	YS10	1	YS19	2	YS28	2	YS37	2
YS2	2	YS11	1	YS20	1	YS29	2	YS38	2
YS3	1	YS12	1	YS21	1	YS30	2	YS39	2
YS4	2	YS13	1	YS22	2	YS31	2	YS40	2
YS5	2	YS14	1	YS23	2	YS32	2	YS41	2
YS6	2	YS15	1	YS24	2	YS33	2	YS42	2
YS7	1	YS16	1	YS25	2	YS34	2	YS43	3
YS8	1	YS17	1	YS26	2	YS35	2	YS44	2
YS9	1	YS18	2	YS27	2	YS36	2	YS45	2

注:“1”“2”“3”分别代表森林健康状况中的健康、亚健康、不健康。表 8 同。

表 7 判别函数的系数

Table 7 Coefficients of discriminant function

	类别号		
	1	2	3
$b_1$	4. 720	−1. 885	−16. 148
$b_2$	−1. 460	0. 376	10. 999
$b_3$	−5. 452	1. 127	49. 086
$b_0$	−7. 417	−2. 194	−167. 400

表 8 判别分析的结果

Table 8 Result of discriminant analysis

组别	判别分类结果			总计
	1	2	3	
聚类分析结果	1	15	0	15
	2	0	29	29
	3	0	0	1

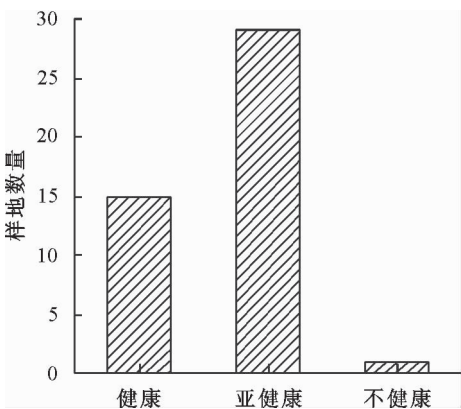


图 1 永寿县刺槐人工林健康评价结果

Fig. 1 Health assessment of artificial black locust forests in Yongshou County

在野外调查以及数据分析过程中,我们发现研究区内林分普遍存在着密度过大、更新能力较差的状况。该县自从上个世纪 80 年代以来,积极种植刺

槐、油松、侧柏等,形成了规模较大的人工林。这些人工林在该地区发挥了水土保持效益,对当地经济社会起到了积极的促进作用。在营林初期,为了保证成林率,树苗栽植密度很大。但是在人工林的发展过程中,却始终缺乏必要的经营措施。这种存在“只种不管”的现象,导致随着林龄的增大,密度逐渐成为制约林分健康发展的因素。与此同时,刺槐林分的过高密度加剧了种间种内竞争,影响了林地内其他灌木以及刺槐幼苗幼树的生长发育。此外,在营林过程中,该地区不注重发展混交林,营造纯林占据了主导地位,这就导致林分结构单一、生物多样性低下,所以对外界干扰抵抗力低。

3 结论与讨论

健康评价对于掌握森林健康状况十分必要,同时能为森林健康经营活动提供理论依据。其中指标体系和评价方法的选择是森林健康评价的关键。由于森林是一个复杂的生态系统,导致研究人员在指标体系、评价方法方面存在不同理解和选择,所以目前尚未有一套获得广泛认同的评价指标体系和评价方法。

笔者认为,评价指标体系应该能够科学地、全面地反映出森林生态系统在结构功能方面的属性特征。同时应该注意控制指标的数量,尽量选择同类研究中使用频率较高的指标,可以节省外业调查和数据处理中的工作量,同时能够保证结果的准确性。尽管目前有很多种数学方法应用在森林健康评价中,但是这些方法或多或少地存在一些缺陷,例如评价指标之间的信息重叠、缺乏对评价结果正确性的验证等。所以考虑将多种数学方法结合起来使用不

失为一种有意义的尝试。

本研究采用立地质量、枯枝比、更新、郁闭度、密度、平均胸径、平均树高、病虫害等 8 个基本指标,通过应用主成分分析、聚类分析和判别分析对永寿县刺槐人工林健康状况进行研究,其中前 3 个主成分的累计贡献率>80%,可以认为前 3 个主成分含有原有指标的大部分信息,可用来替代原有指标体系;聚类分析结果显示,研究区刺槐人工林中处于健康状态的林分占 33.33%,亚健康占 64.44%,不健康占 2.22%;判别分析结果与聚类分析结果完全一致,聚类分析是准确的。

通过研究结果可以看出研究区内有近半林分处于非健康状态,使得刺槐人工林难以发挥应有的生态效益。所以建议对区域内的人工林采取必要的抚育经营措施,包括疏伐、补植改造等,最后使得区域内的人工林健康水平提高,正常发挥其生态效益。

参考文献:

[1] 李静锐,张振明,罗凯. 森林生态系统健康评价指标体系的建立[J]. 水土保持研究,2007,14(3):173-175.  
LI J R,ZHANG Z M,LUO K. The establishment of forest ecosystem health assessment index [J]. Research of Soil and Water Conservation,2007,14(3):173-175. (in Chinese)

[2] 刘金良,于泽群,张顺祥,等. 渭北黄土高原区刺槐人工林健康评价体系的构建[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(06):93-99.  
LIU J L,YU Z Q,ZHANG S X,*et al.* Establishment of forest health assessment system for black locust plantation in Weibei Loess Plateau [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed.,2014,42(6):93-99. (in Chinese)

[3] 刘君昂,刘红娟. 森林健康评价方法与应用[J]. 中南林业科技大学学报,2009,29(6):197-200.  
LIU J A,LIU H J. Forest health assessment methods and application [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology,2009,29(6):197-200. (in Chinese)

[4] 施明辉,赵翠薇,郭志华,等. 森林健康评价研究进展[J]. 生态学杂志,2010,29(12):2498-2506.  
SHI M H,ZHAO C W,GUO Z H,*et al.* Review on forest health assessment [J]. Chinese Journal of Ecology,2010,29(12):2498-2506. (in Chinese)

[5] 王彦辉,肖文发,张星耀. 森林健康监测与评价的国内外现状和发展趋势[J]. 林业科学,2007,43(7):78-85.  
WANG Y H,XIAO W F,ZHANG X Y. Current status and development tendency of forest health monitoring and evaluation [J]. Scientia Silvae Sinicae,2007,43(7):78-85. (in Chinese)

[6] 严尚凯,赵忠,宋西德,等. 黄土高原渭北地区油松林健康评价研究[J]. 西北林学院学报,2010,25(5):7-11.  
YANG S K,ZHAO Z,SONG X D,*et al.* Health assessment of

Chinese pine forest in Weibei Loess Plateau [J]. Journal of Northwest Forestry University,2010,25(5):7-11. (in Chinese)

[7] 王忠春,亢新刚,罗仙仙,等. 森林健康评价研究进展[J]. 西北林学院学报,2010,25(5):163-169.  
WANG Z C,KANG X G,LUO X X,*et al.* Progress on the assessment of forest health [J]. Journal of Northwest Forestry University,2010,25(5):163-169. (in Chinese)

[8] 薛沛沛,王兵,牛香,等. 森林生态系统健康评估方法的现状与前景[J]. 中国水土保持科学,2012,10(5):109-115.  
XUE P P,WANG B,NIU X,*et al.* Present situation and prospect of assessment methods of forest ecosystem health [J]. Science of Soil and Water Conservation,2012,10(5):109-115. (in Chinese)

[9] 袁志发,周静宇. 多元统计分析[M]. 北京:科学出版社,2002:188-241.

[10] 张润楚. 多元统计分析[M]. 北京:科学出版社,2008:144-262.

[11] 李玉明. 渭北黄土高原刺槐二元材积表的编制[J]. 西北林学院学报,1984(1):95-98.  
LI Y M. A study on composing standard volume table of black locust in Weibei Loess Plateau [J]. Journal of Northwest Forestry University,1984(1):95-98. (in Chinese)

[12] 刘恩田,赵忠,宋西德,等. 渭北黄土高原刺槐林健康评价指标体系的构建[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(10):67-75.  
LIU E T,ZHAO Z,SONG X D,*et al.* Construction of index system for stand health assessment of locust forest in the Weibei Loess Plateau [J]. Journal of Northwest A&F University:Nat. Sci. Ed.,2010,38(10):67-75. (in Chinese)

[13] 胡焕香,余济云,张敏,等. 基于小班尺度的宁远河流域森林健康评价研究[J]. 西北林学院学报,2013,28(2):182-186.  
HU H X,SHE J Y,ZHANG M,*et al.* Assessment on the health of the forests in Ningyuan River basin [J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(2):182-186. (in Chinese)

[14] 李艳双,曾珍香,张闯,等. 主成分分析法在多指标综合评价方法中的应用[J]. 河北工业大学学报,1999,28(1):94-97.  
LI Y S,ZENG Z X,ZHANG M,*et al.* Application of primary component analysis in the methods of comprehensive evaluation for many indexes [J]. Journal of Hebei University of Technology,1999,28(1):94-97. (in Chinese)

[15] 叶协锋,魏跃伟,杨宇熙,等. 基于主成分分析和聚类分析的烤烟质量评价模型构建[J]. 农业系统科学与综合研究,2009,25(3):268-276.  
YE X F,WEI Y W,YANG Y X. Model of the quality evaluation of flue-cured tobacco based on principal component analysis and cluster analysis [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture,2009,25(3):268-276. (in Chinese)