DOI: 10.5846/stxb201505080947
彭舜磊,吕建华,陈昌东,齐光,赵干卿.宝天曼自然保护区主要森林类型自然度评价.生态学报,2016,36(24): - .
Peng S L, Lü J H, Chen C D, Qi G, Zhao G Q.Naturalness assessment of the main forest types in the Baotianman National Nature Reserve.Acta Ecologica Sinica,2016,36(24): - .

宝天曼自然保护区主要森林类型自然度评价

彭舜磊[1,2,*],吕建华[1],陈昌东[1],齐 光[1],赵干卿[1]
1 平顶山学院低山丘陵区生态修复重点实验室, 平顶山　467000
2 中国科学院地理科学与资源研究所,生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京　100101

摘要:自然度评价对于自然保护区生物多样性保护和森林管理具有重要意义。以宝天曼自然保护区主要林型 35 个样地为研究对象,对 27 个群落指标进行主成分分析,计算自然度指数值(N),对 N 值进行 Ward 聚类,划分自然度等级。结果表明:宝天曼自然保护区主要林型的自然度可划分为 5 个等级组,自然度高的样地:N 值在 2.18—1.13 之间,平均林龄 94a,占调查样地总数的 20.0%;自然度较高的样地:N 值在 1.01—0.34 之间,占调查样地总数的 34.3%,平均林龄 80a;自然度中等的样地:N 值在 0.01— -0.47 之间,占调查样地总数的 17.1%,平均林龄为 47a;自然度较低的样地:N 值在-0.92—-1.60 之间,占调查样地总数的 14.3%,平均林龄为 26a;自然度低的样地,N 值在-1.98—-2.54 之间,占调查样地总数的 14.3%,平均林龄为 21a。前 3 个主成分中土壤容重、有机质、全氮、硝态氮、林龄、优势树种平均胸径、乔木层、灌木层和草本层的多样性指数荷载较大,是影响森林自然度的主要因子。N 值与林龄、乔木层和灌木层的 Shannon-Wiener 指数、海拔、土壤容重的线性拟合均达到极显著水平($P<0.001$),与土壤有机质和全氮的关系符合对数曲线($R^2>0.794$,$R^2=0.815$,$P<0.0001$)。在海拔 1118—1863m 区域,森林自然度较高,海拔 970m 以下区域,森林自然度较低。针对不同自然度等级的森林,分别提出了相应的保护和经营措施。

关键词:宝天曼自然保护区;自然度;植被特征;土壤质量;主成分分析;Ward 聚类

Naturalness assessment of the main forest types in the Baotianman National Nature Reserve

PENG Shunlei[1,2,*], LÜ Jianhua[1], CHEN Changdong[1], QI Guang[1], ZHAO Ganqing[1]
1 *Key Laboratory of Ecological Restoration in the Hilly Area, Pingdingshan University, Pingdingshan* 467000, *China*
2 *Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*

Abstract: Assessment of forest naturalness plays an important role in biodiversity conservation and forest management. In the present study, we selected thirty-five plots from the main forest types, and investigated 30 indicators (three topographic indicators and 27 community indicators) in the Baotianman National Nature Reserve. Community indicators (27) were analyzed using the PCA method to determine forest naturalness index values (N). N values were clustered using the Ward cluster method, and naturalness classes were classified according to those cluster groups. The results showed that: the degrees of forest naturalness were divided into five grades: highest naturalness plots: with N values ranging from 2.18 to 1.13, an average stand age of 94a, and total plots accounting for 20.0%; higher naturalness plots: with N values ranging from 1.01 to 0.34, an average stand age of 80a, and total plots accounting for 34.3%; medium naturalness plots: with N values ranging from 0.01 to -0.47, an average stand age of 47a, and total plots accounting for 17.1%; lower naturalness

基金项目:中国博士后科学基金面上项目(2014M561043);河南省教育厅科学技术重点研究项目(14A180011);河南省科技攻关计划资助项目(14A180011, 162102310247)
收稿日期:2015-05-08;　　**网络出版日期**:2015-00-00
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail:pengshunlei@163.com

plots: with N values ranging from −0.92 to −1.60, an average stand age of 26a, and total plots accounting for 14.3%; and lowest naturalness plots: with N values ranging from −1.98 to −2.54, an average stand age of 21a, and total plots accounting for of 14.3%. Among the first three principal components, soil bulk density, soil organic matter, total nitrogen, nitrate nitrogen, stand age, mean diameter at breast height (DBH) of the dominant trees, and diversity indices of the arbor, shrub, and herb layers were all greater than the other indicators, and were key factors that influenced forest naturalness. The N value was significantly negatively linear when fitted to soil bulk density ($R^2 = 0.763$, $P < 0.0001$), and significantly positively linear when fitted to stand age, and Shannon-Wiener indices of shrub and arbor layers and altitude, respectively ($P < 0.001$). Logarithmic curve fitting reached significant levels between N value and soil organic matter, and total nitrogen, respectively ($R^2 > 0.794$, $R^2 = 0.815$, $P < 0.0001$). Greater forest naturalness was observed at sites at an altitude of 1118—1863 m. At an altitude of <970 m, forest naturalness sharply decreased. Based on the different classes of forest naturalness, some corresponding measures for discussion and management were proposed.

Key Words: Baotianman National Nature Reserve; naturalness; vegetation characteristics; soil quality; principal component analysis; Ward Cluster

过去几百年来,由于人类活动的过度干扰,全球森林面积在以每年 9.4×10^6 hm^2速度急剧减少[1],天然林遭到巨大破坏,现存的森林处于不同的退化状态,生物多样性锐减[2]。现实森林群落与原始森林群落物种丰富度、空间分布、更新状况及其生境的对比研究是进行森林恢复的前提和基础[2]。因此,现实森林的自然度评价对于退化森林生态系统的恢复与生物多样性保护尤为重要[3-5]。

自然度(Naturalness)是指现实植被离开原始植被的距离[6-7]。由于完全没有受到人为干扰的原始森林参照系难以寻觅,90 年代以前,国外主要通过生态干扰度或演替阶段等级划分,确定自然度评价等级序列,对自然度进行定性评价[6,8-9],国内也常借鉴该方法对森林自然度进行评价[10-13],该方法简单易行,但生态干扰度的划分主观性强,完整的演替序列在同一地区很难找到,影响评价结果的可靠性[7,14]。有些学者用潜在植被或历史植被作为参照系,对森林自然度进行评价[15-16],潜在植被是人们假想的参照系,历史植被的信息在很多地区没有完整记录,其评价结果的可靠性尚待验证[4, 14]。90 年代之后,国外学者利用森林群落的物种丰富度、林龄、植被的水平和垂直结构、枯死木的数量、物种更新状况、乡土树种所占的比例等指标,构建自然度评价体系,结合生态干扰度,对自然度进行定量评价[15-20]。一些研究表明,林下植被物种多样性、枯死木和土壤性质等群落指标对自然度有很好的指示作用[20-23]。在国内,很多学者借鉴国外自然度评价体系,采用层次分析法[24-27]或灰色关联度[28-30]对不同区域森林的自然度进行了定量评价。定量评价的指标通过森林群落调查直接获取,更为客观,但也存在指标体系不完善、权重赋值和分级标准受人为因素影响大的不足。

综上所述,目前,森林自然度评价尚未有统一的方法[14],在自然度评价过程中,国内外的研究多关注植被指标,忽视土壤指标,评价指标体系尚需完善,而且森林自然度与群落主要特征指标的关联性研究尚存在不足。本文以宝天曼自然保护区主要森林类型为研究对象,通过对森林群落植被和土壤指标全面调查,构建科学合理的指标评价体系,对其自然度进行评价,探讨林龄、物种多样性、土壤理化性质等指标对森林自然度的影响,为宝天曼自然保护区退化森林生态系统恢复和生物多样性保护提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

宝天曼国家级自然保护区为世界生物圈保护区,位于河南省西南部秦岭东段,伏牛山南坡的内乡和南召两县境内(111°47′—112°04′E, 33°25′—33°33′N),海拔高度 600—1863m,年平均气温 15.1℃,年降水量 855.6 mm。地貌以切割程度不同的中山为主,低山为辅,主要岩石是花岗岩、石灰岩和砂岩,区内土壤划分 3 个土类:海拔 1300 m 以上为山地棕壤土类,海拔 800—1300 m 为山地黄棕壤土类,海拔 800 m 以下为山地褐土。

植被区划属暖温带落叶阔叶林区,垂直分布明显,海拔 600—1200 m,以栓皮栎(*Quercus variabilis*)林为主;海拔 1100—1300 m 以短柄枹栎(*Quercus serrata* var. *brevipetiolata*)林为主;海拔 1300—1600 m 以锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acutiserrata*)林为主;海拔 1600—1750 m 为由华山松(*Pinus armandii*)、锐齿栎组成的针阔混交林;海拔 1700 m 以上有锐齿栎、坚桦(*Betula chinensis*)组成的山顶矮曲林,局部地段有山杨(*Populus davidiana*)、红桦(*Betula albo-sinensis*)、化香(*Platycarya strobilacea*)、槭类(*Acer*)林等[31]。

1.2　研究方法

1.2.1　样地设置与调查

2013 年 7 月,在河南省内乡县宝天曼国家自然保护区及周边区域,从海拔 271 m 的马山岈到海拔 1863 m 最高峰曼顶,根据主要分布的林型,在有代表性的地段按照海拔、林分起源、林龄、坡度、坡向等因子梯度分别设置样地 35 个,其中自然保护区内 28 个,周边区域对照 7 个。用 GPS 记录每个样地的经纬度和海拔,用罗盘仪记录样地的坡向和坡度(表 1)。每个乔木的样地面积为 20 m×20 m,在每个乔木样地内的四周和中心分别设置 5 m×5 m 的灌木样方和 1 m×1 m 的草本样方各 5 个。把乔木样地划分为 16 个 5 m×5 m 的小样方,对乔木进行每木调查,用胸径围尺测胸径(游标卡尺测幼树的地径),划分主林层优势树种的径级,每径级选择 1 株标准木,用生长锥测试标准木的树龄,各标准木树龄的平均值作为林分的年龄。以样地的西南角为坐标原点,东西向为 x 轴,南北向为 y 轴,对每株乔木进行坐标定位。记录林分年龄、乔木树种名称、胸径、树高、冠幅、郁闭度、坐标等;灌木和草本分别记录其种名、株数、多度、频度、盖度等。物种丰富度指数(S)、Simpson 指数(D)、Shannon-Wiener 指数(H')和 Pielou 均匀度指数(J_{sw})的计算方法见文献[32]。

表 1　宝天曼自然保护区主要林型样地概况

Table 1　Summary characteristics of the main forest plots in Baotianman National Nature Reserve

样地号 No.	东经/(°) Longtitude	北纬/(°) Latitude	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope	坡向 Aspect	坡位 Postion	林型 Forest type	林龄/a Stand age	郁闭度 Canopy density	林分起源 Forest origin
1	111.88	33.48	662	49	西南	上坡	栓皮栎	30	0.90	天然林
2	111.92	33.37	559	45	西北	山脊	槲栎	6	0.95	天然林
3	111.92	33.35	532	45	西南	上坡	槲栎	6	0.95	天然林
4	111.92	33.39	533	45	北	上坡	槲栎	7	0.80	天然林
5	111.90	33.50	773	35	南	上坡	栓皮栎+化香	30	0.80	天然林
6	111.92	33.50	970	40	西南	上坡	栓皮栎	20	0.80	天然林
7	111.92	33.17	934	40	西南	中坡	栓皮栎	20	0.80	天然林
8	111.98	33.21	271	16	东	下坡	栓皮栎	55	0.70	人工林
9	111.97	33.21	294	15	南	下坡	栓皮栎	55	0.85	人工林
10	111.90	33.28	393	15	北	中坡	栓皮栎	45	0.85	天然林
11	111.91	33.28	368	10	东北	下坡	侧柏	30	0.50	人工林
12	111.92	33.50	1129	36	西南	中坡	栓皮栎+短柄枹	65	0.80	天然林
13	111.92	33.50	1143	20	东南	中坡	短柄枹+栓皮栎+茅栗	65	0.75	天然林
14	111.92	33.50	1118	35	西	上坡	栓皮栎+短柄枹	100	0.80	天然林
15	111.92	33.51	1326	16	东南	中坡	栓皮栎	80	0.80	天然林
16	111.92	33.51	1353	20	东	上坡	短柄枹	80	0.85	天然林
17	111.88	33.52	1396	12	东南	中坡	锐齿栎	60	0.80	天然林
18	111.94	33.52	1453	8	东北	中上坡	锐齿栎	60	0.90	天然林
19	111.94	33.52	1495	6	西南	沟谷	锐齿栎	60	0.75	天然林
20	111.94	33.52	1556	45	西南	上坡	锐齿栎	65	0.85	天然林
21	111.94	33.51	1590	30	西	上坡	栓皮栎+华山松	65	0.85	天然林
22	111.94	33.51	1622	28	东北	上坡	锐齿栎	60	0.80	天然林

续表

样地号 No.	东经/(°) Longtitude	北纬/(°) Latitude	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope	坡向 Aspect	坡位 Postion	林型 Forest type	林龄/a Stand age	郁闭度 Canopy density	林分起源 Forest origin
23	111.94	33.51	1638	16	西南	上坡	锐齿栎	60	0.70	天然林
24	111.93	33.49	1294	20	东南	上坡	栓皮栎	130	0.80	天然林
25	111.93	33.49	1300	26	西南	上坡	栓皮栎	130	0.80	天然林
26	111.93	33.50	1314	2	南	山脊	短柄枹	60	0.80	天然林
27	111.93	33.50	1400	35	东南	上坡	短柄枹	65	0.85	天然林
28	111.93	33.50	1396	28	东南	山坡	短柄枹	60	0.80	天然林
29	111.94	33.51	1715	10	东南	中坡	锐齿栎	130	0.90	天然林
30	111.94	33.51	1766	10	东南	上坡	锐齿栎	150	0.85	天然林
31	111.95	33.50	1863	32	东南	山脊	锐齿栎+华山松	110	0.80	天然林
32	111.95	33.50	1863	30	西北	山脊	锐齿栎+红桦	110	0.80	天然林
33	111.95	33.50	1860	30	西北	山脊	锐齿栎+血皮槭	110	0.80	天然林
34	111.89	33.48	646	3	西	下坡	杨树	4	0.80	人工林
35	111.89	33.31	655	15	南	中坡	栓皮栎	15	0.80	天然林

槲栎(*Quercus aliena*),侧柏(*Platycladus orientalis*),茅栗(*Castanea seguinii*),血皮槭(*Acer griseum*),杨树(*Populus × euramericana*)

1.2.2 土壤调查及测试

在每个乔木样地内随机选取样点 3 个,用土钻每 10 cm 为一层进行分层取样,共取三层(至 30 cm 处)。所取土样装入对应标记的采样袋内,备测土壤养分指标。同时在每个样点挖取 0—30 cm 土壤剖面,用环刀按 0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm 土层取土样,备测土壤容重。土壤测定指标包括:土壤容重、土壤有机质、速效钾、速效磷、硝态氮、铵态氮、全氮、全磷和全钾。土壤容重采用环刀烘干法,土壤有机质采用 TOC 分析仪,土壤全磷和速效磷采用钼锑抗比色法,全氮、硝态氮和铵态氮采用凯氏定氮法,速效钾和全钾-火焰光度计法。

1.3 宝天曼自然保护区主要林型自然度评价方法

1.3.1 构建评价指标体系

为了全面、客观地评价森林自然度,选择 27 个反映森林群落植被和土壤特征的调查指标(林龄,乔木层、灌木层、草本层物种丰富度、Simpson 指数、Shannon-wiener、Pielou 均匀度指数,郁闭度,幼苗更新个数,林分密度,优势木平均胸径,优势木平均树高,土壤容重,土壤有机质,速效钾,速效磷,硝态氮,铵态氮,全氮,全磷,全钾)建立评价指标体系,对该指标体系进行主成分分析。

1.3.2 自然度主成分分析方法

采用主成分分析法对群落的自然度进行分析,以特征根的累计贡献率达 85%以上为参考值,确定主成分个数 m。对 m 个主成分得分(F_1, F_2, F_3,…, F_m)进行加权求和,得到各个样地的主成分综合得分值 F,本文 F 值越负,排名越靠前,为了便于分析,我们定义自然度指数 $N=-F$,但不改变排名。

1.3.3 自然度高低等级划分方法

对 35 个样地的自然度指数值 N 进行 Ward 聚类,依据聚类族数,划分自然度等级。然后,依据自然度等级对各样地的自然度进行评价。

1.3.4 群落自然度与群落主要指标的关系分析

选择海拔和第一主成分中荷载较大的指标:林龄、乔灌层 Shannon-Wiener 指数、土壤容重、有机质和全氮含量与自然度指数 N 分别建立回归方程,探讨这些指标与自然度的关系。

1.4 数据统计分析方法

用 R 软件(Version 3.2.2,R Core Team)中的 scale 函数对 35 个样地的 27 个参评指标进行标准化处理,用 princomp 函数进行主成分分析(PCA),计算自然度指数(N),用 hclust 函数对 N 进行 Ward 聚类,划分自然度等级;用 Sigmaplot 软件(Version 12.5,Systat Software Inc)对自然度指数(N)与群落主要指标间的关系进行回

归分析并绘图。

2　结果与分析

2.1　森林自然度因子主成分分析

对 27 个森林群落指标进行主成分分析(表 2),前 8 个主成分的累积贡献率为 86.92%,超过了 85%,解释率已极为显著,包含了 27 个指标的绝大部分信息量。7 个主成分中,前 3 个特征根和贡献率较大,其中第一主成分的特征根为 9.35,贡献率最大。

表 2　宝天曼自然保护区主要林型自然度评价因子的特征根、贡献率和累积贡献率

Table 2　Initial Eigenvalues, contribution rate, and cumulative contribution rate for naturalness assessment factors of the main forest types in Baotianman National Nature Reserve

主成份 Components	特征根 Initial Eigenvalues		
	合计 Total	贡献率/% Contribution rate	累积贡献率 /% Cumulative contribution rate
1	9.35	34.63	34.63
2	3.45	12.79	47.42
3	3.16	11.69	59.12
4	2.01	7.44	66.56
5	1.77	6.56	73.12
6	1.49	5.51	78.64
7	1.26	4.65	83.29
8	0.98	3.63	86.92

主成分荷载分析表明:第一主成分中土壤容重、全氮和有机质的荷载最大,分别为-0.89、0.88 和 0.86,其次是灌木层和乔木层的物种丰富度、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数以及林龄和优势木平均胸径,优势木平均胸径与林分生物量密切相关,第一主成分体现了土壤质量、林龄和乔、灌层多样性指数信息和林分生物量信息;第二主成分中,草本层 4 个多样性指数的荷载系数较大,分别为 0.66、0.75、0.78 和 0.64,反映了林下草本层物种多样性状况;第三主成分乔木层 Pielou 均匀度指数的荷载较大;第四主成分林分密度的荷载系数最大,体现了林分密度;第五主成分土壤全钾的荷载最大,体现钾素含量信息;第六主成分中郁闭度和幼苗更新数量荷载较大,体现了林分郁闭度和幼苗更新潜力;第七主成分中土壤全磷含量荷载最大,反映了土壤磷素状况;第八主成分中幼苗更新数量和硝态氮的荷载较大,体现了幼苗更新潜力和土壤肥力。

35 个样地主成分得分和自然度指数 N 计算结果及排序如表 4 所示:35 个样地的 N 值随机分布在 2.18 到 -2.54 之间, 排名前 3 位分别是 33、32 和 18 号样地,排名后 3 位的为 11、2 和 8 号样地。33 号样地 N 值最大(2.18),11 号样地 N 值最小(-2.54)。

表 3　宝天曼自然保护区主要林型自然度评价因子主成分荷载矩阵

Table 3　Component matrix for the naturalness assessment factors of the main forest types in Baotianman National Nature Reserve

群落变量 Community variables	主成分荷载 Component matrix							
	1	2	3	4	5	6	7	8
林龄 Stand age	0.70	-0.34	-0.02	-0.16	-0.05	-0.22	-0.07	-0.14
乔木层丰富度 Arbor layer richness	0.67	-0.22	0.37	0.32	0.18	-0.27	0.02	0.10
乔木层 simpson 指数 Arbor layer simpson index	0.61	-0.45	0.59	0.06	0.15	-0.10	0.06	-0.06
乔木层 shannon 指数 Arbor layer shannon index	0.66	-0.39	0.55	0.11	0.15	-0.22	0.05	0.02
乔木层 pielou 指数 Arbor layer pielou index	0.43	-0.46	0.68	-0.11	0.04	-0.06	0.14	-0.17
灌木层丰富度 Shrub layer richness	0.64	-0.38	-0.27	0.28	0.10	0.32	0.25	-0.09
灌木层 simpson 指数 Shrub layer simpson index	0.74	-0.13	-0.48	0.26	-0.01	0.08	0.21	-0.18

续表

群落变量 Community variables	主成分荷载 Component matrix							
	1	2	3	4	5	6	7	8
灌木层 shannon 指数 Shrub layer shannon index	0.78	−0.20	−0.38	0.28	0.05	0.19	0.20	−0.18
灌木层 pielou 指数 Shrub layer pielou index	0.56	0.27	−0.52	0.09	−0.11	−0.25	0.01	−0.30
草本层丰富度 Herb layer richness	0.26	0.66	0.20	0.27	−0.08	0.29	0.05	−0.17
草本层 simpson 指数 Herb layer simpson index	0.48	0.75	0.32	0.07	0.18	−0.01	−0.16	−0.05
草本层 shannon 指数 Herb layer shannon index	0.46	0.78	0.33	0.09	0.19	0.05	−0.08	−0.05
草本层 pielou 指数 Herb layer pielou index	0.50	0.64	0.27	−0.01	0.31	−0.11	−0.15	−0.02
郁闭度 Canopy density	0.08	−0.20	0.22	0.37	0.27	0.59	−0.36	−0.09
更新幼苗数量 Seedling number	−0.43	−0.14	0.25	0.08	0.04	0.56	0.18	0.40
林分密度 Stand density	0.08	0.13	−0.40	0.74	0.01	−0.15	−0.02	0.08
优势木平均胸径 The mean DBH of dominant trees	0.62	−0.19	−0.33	−0.39	0.38	−0.05	−0.27	0.13
优势木平均树高 The mean height of dominant trees	0.44	−0.09	−0.59	−0.27	0.43	−0.10	−0.26	0.14
土壤容重 Soil bulk density	−0.89	0.09	0.02	0.09	0.21	−0.13	0.24	−0.05
土壤有机质 Soil organic matter	0.86	0.07	0.07	−0.17	−0.36	0.14	−0.15	0.08
速效钾 Available K	0.62	0.07	0.05	0.22	0.01	−0.15	0.33	0.32
速效磷 Available P	0.51	0.29	−0.30	−0.14	0.29	0.09	0.26	0.36
硝态氮 Nitrate nitrogen	0.75	0.19	0.02	−0.07	−0.22	−0.05	0.17	0.41
铵态氮 Ammonium nitrogen	0.61	−0.21	−0.13	−0.26	−0.16	0.42	−0.24	−0.09
全氮 Total nitrogen	0.88	0.06	0.09	−0.15	−0.35	0.12	−0.13	0.08
全磷 Total phosphorus	0.31	0.36	0.07	−0.52	−0.31	0.12	0.49	−0.21
全钾 Total potassium	−0.09	0.07	−0.01	−0.39	0.73	0.18	0.35	−0.20

表中下划线数字表示荷载较大的因子

表 4 宝天曼自然保护区 35 个森林样地自然度评价因子主成分得分、自然度指数值及排名

Table 4 Principal components scores, naturalness index assessment values and ranks for 35 forest plots in Baotianman National Nature Reserve

样地号 No.	F_1	F_2	$F3$	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	综合得分值 F scores	自然度指数值 Naturalness index N	排名 Rank
1	2.59	−2.73	−0.30	−0.67	−2.45	−0.14	1.77	0.01	0.43	−0.43	24
2	4.73	0.57	3.12	1.05	0.53	−2.49	0.21	0.73	2.40	−2.40	34
3	2.99	1.68	3.74	−0.69	1.27	−1.21	0.16	1.76	1.98	−1.98	31
4	6.77	−2.62	0.89	0.83	−1.15	−2.57	−1.27	−1.88	2.11	−2.11	32
5	2.15	−0.90	2.23	−0.33	0.44	1.68	1.42	−0.40	1.19	−1.19	27
6	1.81	2.81	2.24	−0.08	2.94	−0.37	−0.49	−0.08	1.60	−1.60	30
7	2.97	−0.15	−0.85	0.57	0.34	−0.63	−2.50	−0.58	0.92	−0.92	26
8	4.09	3.04	−2.11	1.54	0.02	1.99	1.87	−0.08	2.15	−2.15	33
9	4.32	0.35	−2.76	−0.17	0.96	−0.07	1.51	−1.24	1.48	−1.48	29
10	1.56	0.07	−0.18	−3.31	−0.30	0.37	−0.04	−0.03	0.32	−0.32	23
11	5.62	1.60	−0.10	1.81	−2.76	3.00	−2.52	1.90	2.54	−2.54	35
12	0.73	−2.13	−0.23	0.72	0.94	−0.50	0.13	−0.58	0.03	−0.03	21
13	−1.83	−1.11	0.44	−0.63	1.23	1.41	−0.84	0.32	−0.74	0.74	14
14	0.17	−3.29	−1.26	1.24	1.58	0.16	−1.00	−0.06	−0.41	0.41	18
15	−3.08	−0.64	0.53	−0.18	1.26	0.74	−2.15	−1.59	−1.31	1.31	4
16	−0.06	−1.67	−1.88	0.67	0.32	0.10	0.87	1.21	−0.34	0.34	19
17	−0.81	−0.39	−2.64	−0.63	−1.03	−0.81	−0.21	1.12	−0.88	0.88	10
18	−4.15	2.27	−1.71	−1.19	1.35	−2.42	−0.06	1.02	−1.66	1.66	3
19	−3.05	2.56	−2.57	3.00	0.96	−0.82	−0.28	−0.27	−0.94	0.94	9
20	−2.09	0.73	−0.86	1.08	0.76	−0.33	0.50	1.68	−0.61	0.61	17

续表

样地号 No.	F_1	F_2	$F3$	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	综合得分值 F scores	自然度指数值 Naturalness index N	排名 Rank
21	0.51	0.09	-1.29	0.61	-1.02	-1.20	0.97	-0.23	-0.01	0.01	20
22	-0.73	-0.40	3.72	1.09	0.82	1.59	2.14	-1.38	0.47	-0.47	25
23	-5.10	2.33	-0.11	1.96	-1.56	0.07	-0.06	-2.50	-1.76	1.76	2
24	-1.50	-3.07	-0.30	0.97	1.86	0.78	-0.47	0.85	-0.80	0.80	12
25	-1.64	-1.27	-0.82	0.57	0.51	1.20	0.28	0.18	-0.77	0.77	13
26	-0.08	-2.87	-0.92	-1.30	0.31	0.61	-0.13	0.41	-0.62	0.62	16
27	-1.80	-1.68	-0.90	-1.09	-0.78	-0.89	1.10	-0.33	-1.25	1.25	5
28	-1.09	0.66	-1.89	-1.49	0.52	0.29	0.49	0.18	-0.63	0.63	15
29	-2.91	-0.98	1.53	-1.38	-0.24	1.33	-0.81	0.01	-1.19	1.19	6
30	-3.63	0.35	1.72	0.11	-0.53	0.04	0.85	0.42	-1.13	1.13	7
31	-2.08	-0.22	1.05	1.07	-2.97	-1.22	0.62	0.99	-0.85	0.85	11
32	-3.65	1.19	2.81	-0.69	-1.02	0.27	0.09	0.21	-1.01	1.01	8
33	-5.39	0.00	1.59	0.33	-2.16	-0.57	-1.19	-0.16	-2.18	2.18	1
34	2.53	4.10	-0.91	-1.02	-0.26	0.57	-0.26	-0.87	1.37	-1.37	28
35	1.13	1.75	-1.02	-4.37	-0.69	0.04	-0.71	-0.77	0.08	-0.08	22

2.2　森林自然度等级评价

对自然度指数 N 进行 Ward 聚类,把 35 个样地划分为 5 个聚类组(图 1)。Ⅰ组包括 7 个样地:33、23、18、15、27、29 和 30 号,N 值在 2.18—1.13 之间,为自然度高的样地,占调查样地总数的 20%。该组样地平均海拔 1594 m,平均林龄 94a,均为天然林;Ⅱ组包括 12 个样地,N 值在 1.01—0.34 之间,为自然度较高的样地,占调查样地总数的 34.3%。平均海拔 1311 m,平均林龄 80a,均为天然林;Ⅲ组包括 6 个样地,N 值在 0.01— -0.47 之间,为自然度中等的样地,占调查样地总数的 17.1%。平均海拔 1009 m,平均林龄为 47a,均为天然林;Ⅳ组包括 5 个样地,N 值在-0.92—-1.60 之间,为自然度较低的样地,占调查样地总数的 14.3%。平均海拔 723 m,平均林龄为 26a,除 9 和 34 号样地为人工林,其余为天然林;Ⅴ组的 N 值在-1.98—-2.54 之间,为自然度低的样地,包括 5 个样地:3、4、8、2 和 11 号,占调查样地总数的 14.3%。平均海拔 453 m,平均林龄为 21a,其中 2、3、4 号样地为幼龄槲栎林,8 号样地为栓皮栎人工林,11 号样地为侧柏人工林(图 1 和表 1)。

2.3　森林自然度与森林群落主要指标的关系

自然度指数 N 随林龄、乔木层和灌木层的 Shannon-Wiener 指数增大而显著增大($P<0.001$)(图 2);在群落环境和土壤主要指标中, N 随海拔升高而显著增大($R^2=0.708$,$P<0.001$),随土壤容重的增加而显著降低($R^2=0.763$,$P<0.001$),N 随土壤有机质和全氮含量的增加呈显著的自然对数曲线增长趋势($R^2>0.794$,$R^2=0.815$,$P<0.0001$)(图 3)。7 个指标中,土壤容重、有机质、全氮和灌木层 Shannon-Wiener 指数对自然度指数解释率较高。

3　结论与讨论

3.1　宝天曼自然保护区森林的自然度及主要影响因子分析

本文通过对宝天曼自然保护区 35 个森林样地 27 个群落指标的调查,构建了比较全面的自然度评价体系,为了避免人为权重赋值的影响,采用主成分分析法(PCA)计算自然度指数值,较为客观。然后,通过 Ward 聚类划分自然度等级,Ward 聚类对所有样地两两之间的自然度距离进行计算,把自然度距离较近的样地聚为一类,距离远的聚为另外一类,依此划分自然度等级,符合自然度的定义,比较合理。评价结果表明:宝天曼自然度保护区森林自然度较高,自然度等级中等以上的样地占调查总样地的 71.4%,主要分布保护区内 1000—1863 m 的区域;自然度等级较低和最低的样地占总样地的 28.6%,主要分布在 970 m 以下干扰严重的低海拔

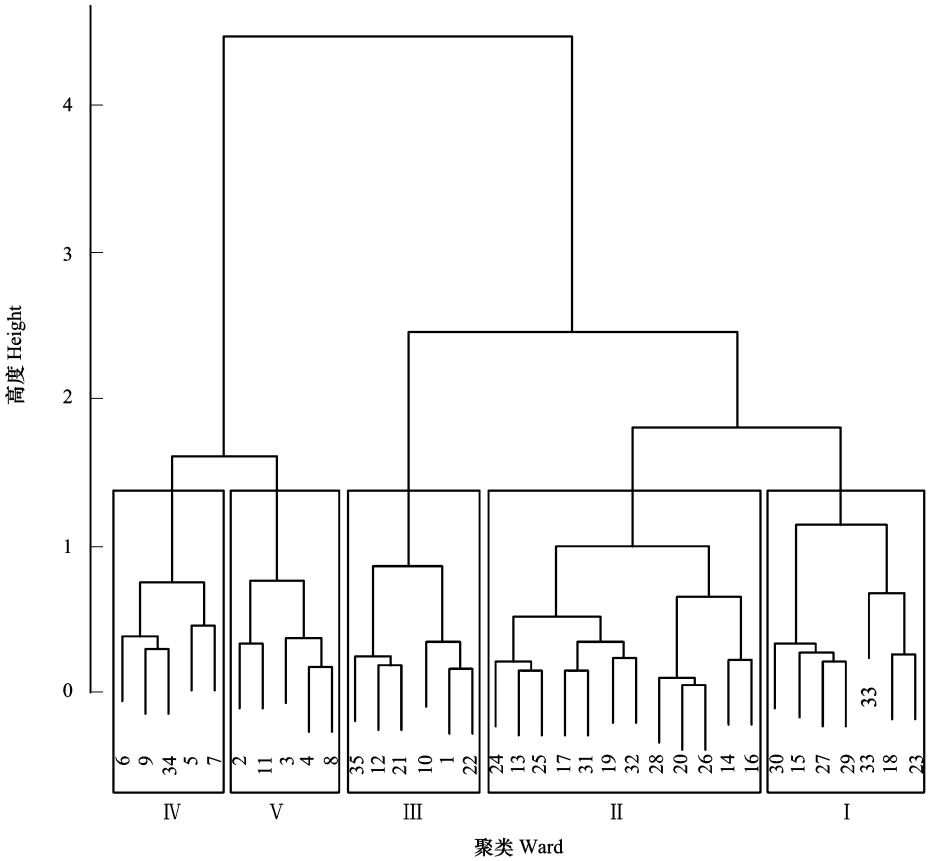

图 1 宝天曼自然保护区 35 个森林样地自然度指数 Ward 聚类图

Fig.1 Ward cluster for naturalness index of 35 forest plots in Baotianman National Nature Reserve

Ⅰ:自然度高的类群 group with highest naturalness;Ⅱ:自然度较高的类群 group with higher naturalness;Ⅲ:自然度中等的类群 group with medium naturalness;Ⅳ、Ⅴ:自然度较低和最低的类群 groups with lower and lowest naturalness

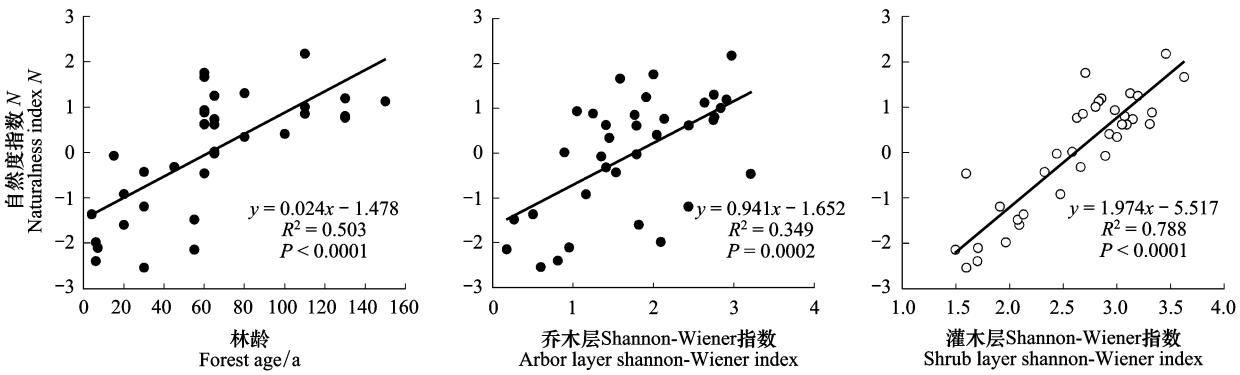

图 2 自然度指数与林龄、乔木层和灌木层 Shannon-Wiener 指数的关系

Fig.2 The relationships between naturalness index and forest age, shannon-wiener indexes in the arbor layer and shrub layer

地段,评价结果符合实际,说明评价结果的可靠性。

很多学者认为森林自然度指标不仅包括群落结构、生物多样性、演替阶段等植被指标,而且包括土壤理化性质指标,是多因子综合作用的结果[6-9, 14]。本研究表明:前 8 个主成分的贡献率达到 86.92%,包含了 27 个指标大部分信息,其中第一主成分的特征值和贡献率最大,该主成分中,土壤容重、有机质、全氮荷载最大,其次是灌木层和乔木层的物种丰富度、Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数以及林龄和优势树种的平均胸径,这

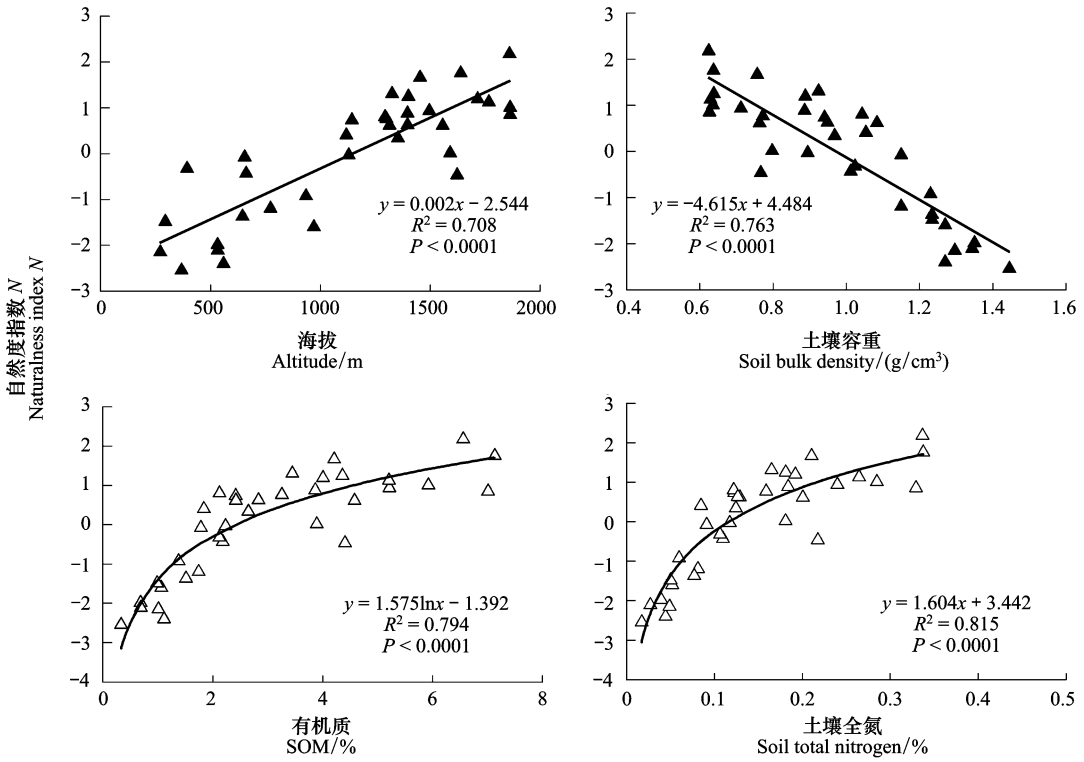

图 3　自然度指数与海拔、土壤容重、土壤全氮和有机质含量的关系

Fig.3　The relationships between naturalness index and altitude, soil bulk density, SOM, and soil total nitrogen

些指标是评价森林自然度的重要指标[17-21, 23]。因为随林龄增加,乔木层和灌木层物种多样性、优势树种胸径和生物量增大,凋落物输入增多,有利于土壤容重降低和有机质及全氮增加,促进森林发育和演替,提高森林自然度[2, 17-19]。本研究表明自然度等级高的样地组平均林龄为 94a,自然度等级较高的样地组平均林龄为 80a,而自然度等级低的样地组平均林龄仅 21a。有些学者认为林下土壤性质、林下植被的物种多样性和死木对森林自然度有指示作用[21-23],与本研究结果一致,土壤容重、有机质和全氮及灌木层的 Shannon-Wiener 指数对自然度指数解释率较高,可以用来指示森林的自然度。本文没有对死木进行系统调查,今后应加强死木对森林自然度的影响研究。

海拔对自然度的影响主要体现在对森林的干扰程度上,在低海拔地段,原始林破坏殆尽,转化为林龄较小次生林和人工林,自然植被多处于演替的早期阶段,自然度很低[2, 5-6]。比如 2、3 和 4 号样地的槲栎林,林龄仅为 6—7a;另外,由于土壤有机质和全氮流失严重,人工纯林即使恢复了几十年,自然度仍然很低,比如 11 号样地 30a 侧柏林和 8 号样地 55a 栓皮栎人工林。原因是其灌木层和乔木层多样性指数低,土壤容重大、有机质和全氮含量低。在海拔较高地段,人类活动干扰小,其自然度较高。比如自然度等级高的 33 号样地锐齿栎与血皮槭混交林和 30 号样地锐齿栎林,27 号样地短柄枹林及 15 号样地栓皮栎林,可以作为较为原始的森林群落,为今后该保护区相应林型自然度评价提供参照系。

3.2　宝天曼自然保护区不同自然度等级森林的经营与保护措施

森林自然度等级评价,可为自然保护区森林资源保护与经营提供参考[3-5]。对自然度等级高和较高级别的森林,必须严格封育保护,划定旅游红线,禁止一切人为活动干扰,保护顶极群落,促进较高自然度等级的森林向顶极群落演替;对中等自然度级别的森林,实行封山育林,保护好林窗,促进次林层生态伴生树种生长,增加乔木层和灌木层物种多样性,保护林下枯枝落叶和粗木质残体,增加土壤有机质和氮素输入,促进群落顺利演替;对处于低海拔地段自然度较低和低等级的森林,分类进行经营:对处于演替早期阶段的森林,严格封育措施,防治人为干扰,促进其自然演替;对地带性树种人工林,比如栓皮栎人工林,可适当择伐,补种该地区演

替前期天然林内出现的混交树种,比如山槐(*Albiza kalkora*)、黄栌(*Cotinus coggygria*)等先锋树种,促进林下灌木和草本层的发育,提高物种多样性和土壤肥力,逐渐把人工林改造成近自然林。对保护区内低海拔地段村庄附近的杨树人工林,应改造成栓皮栎人工林;对侧柏人工林,进行间伐,混交荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、连翘(*Forsythia suspensa*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等灌木,待生境条件改善后,混交栓皮栎树种,待栓皮栎占优势后,逐步伐除侧柏,改造成栓皮栎近自然林。

参考文献(References):

[1] 张永民, 赵士洞. 全球生态系统的状况与趋势. 地球科学进展, 2007, 22(4): 403-409.

[2] Chazdon R L. Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. Science, 2008, 320(5882): 1458-1460.

[3] Moravčík M, Sarvašová Z, Merganič J, Schwarz M. Forest naturalness: criterion for decision support in designation and management of protected forest areas. Environmental Management, 2010, 46(6): 908-919.

[4] Winter S. Forest naturalness assessment as a component of biodiversity monitoring and conservation management. Forestry, 2012, 85(2): 293-304.

[5] Relf A, Walentowski H. The assessment of naturalness and its role for nature conservation and forestry in Europe. Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz, 2008, 36(6): 63-76.

[6] Anderson J E. A conceptual framework for evaluating and quantifying naturalness. Conservation Biology, 1991, 5(3): 347-352.

[7] 吴银莲, 李景中, 杨玉萍, 周志翔. 森林自然度评价研究进展. 生态学杂志, 2010, 29(10): 2065-2071.

[8] Schirmer C. Reflections on assessing the naturalness of present forests. Allgemeine Forst und Jagdzeitung, 1999, 170(1): 11-18.

[9] Tiefenbacher E. Measuring and controlling the degree of naturalness of forest stands. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 1999, 150(7): 246-248.

[10] 张玉环, 汪俊三. 生态破坏等级的自然度研究及应用: 以海南岛为例. 环境科学研究, 1991, 4(5): 45-49.

[11] 王丽丽, 郭晶华. 江西大岗山植被类型及其自然度与经营集约度的划分和评价. 林业科学研究, 1994, 7(3): 286-293.

[12] 刘刚, 陆元昌, Sturm K, 宁金魁, 雷相东. 北京林区森林经营近自然度评价方法的研究与应用. 东北林业大学学报, 2009, 37(5): 114-118.

[13] 张志, 朱金兆, 朱清科, 李永芳, 刘学祥. 蔡家川流域景观自然度研究. 水土保持通报, 2008, 28(5): 128-131.

[14] Mcroberts R E, Winter S, Chirici G, Lapoint E. Assessing forest naturalness. Forest Science, 2012, 58(3): 294-309.

[15] Burga C A, Beer P C. The naturalness of deciduous forest in the central Swiss Plain. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 2004: 162-168.

[16] Gimmi U, Radeloff V C. Assessing naturalness in Northern Great Lakes forests based on historical land-cover and vegetation changes. Environmental Management, 2013, 52(2): 481-492.

[17] Uotila A, Kouki J, Kontkanen H, Pulkkinen P. Assessing the naturalness of boreal forests in eastern Fennoscandia. Forest Ecology and Management, 2002, 161(1/3): 257-227.

[18] Bartha D. Chances for a stand-level evaluation of the naturalness of forests. Allgemeine Forst und Jagdzeitung, 2004, 175: 8-13.

[19] Šaudytė S, Karazija S, Belova O. An approach to assessment of naturalness for forest stands in Lithuania. Baltic Forestry, 2005, 11(1): 39-45.

[20] Laarmann D, Korjus H, Sims A, Stanturf J A, Kiviste A, Köster K. Analysis of forest naturalness and tree mortality patterns in Estonia. Forest Ecology and Management, 2009, 258(Supplement): 187-195.

[21] Standovár T, Ódor P, Aszalós R, Gálhidy L. Sensitivity of ground layer vegetation diversity descriptors in indicating forest naturalness. Community Ecology, 2006, 7(2): 199-209.

[22] Kunttu, P, Junninen K, Kouki J. Dead wood as an indicator of forest naturalness: a comparison of methods. Forest Ecology and Management, 2015, 323: 30-40. http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.05.017.

[23] Robin V, Talon B, Nelle O. Pedoanthracological contribution to forest naturalness assessment. Quaternary International, 2013, 289: 5-15.

[24] 彭舜磊, 王得祥. 秦岭主要森林类型近自然度评价. 林业科学, 2011, 47(1): 135-142.

[25] 赵中华, 惠刚盈. 基于林分状态特征的森林自然度评价—以甘肃小陇山林区为例. 林业科学, 2011, 47(12): 9-16.

[26] 霍艳玲, 金辉, 赵海玉, 王志彬, 刘丽颖, 黄龙生, 李永宁. 杨桦中幼龄次生林结构与自然度的比较研究. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(12): 91-95.

[27] 崔海山, 姜莹, 林媚珍, 蒋甜, 纪少婷. 广州白云山风景区森林自然度评价. 亚热带资源与环境学报, 2015, 10(1): 18-26.

[28] 郝云庆, 王金锡, 王启和, 孙鹏, 蒲春林. 崇州林场不同林分近自然度分析与经营对策研究. 四川林业科技, 2005, 26(2): 20-26.

[29] 何明月. 北京密云水库集水区水源保护林近自然分析与经营模式[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.

[30] 王乃江, 刘增文, 徐钊, 张文辉, 陆元昌, 范少辉, 王勇, 周玲. 黄土高原主要森林类型自然性的灰色关联度分析. 生态学报, 2011, 31(2): 316-325.

[31] 史作民, 刘世荣, 程瑞梅, 蒋有绪. 河南宝天曼植物群落数量分类与排序. 林业科学, 2000, 36(6): 20-27.

[32] 张金屯. 数量生态学(第二版). 北京: 科学出版社, 2011: 19-21.