

基于改进 TOPSIS 法的北京九龙山 森林功能评价

张连金, 孙长忠*, 辛学兵, 孔庆云

(中国林业科学研究院华北林业实验中心, 北京 102300)

摘要:在科学性、系统性、相对独立性和可操作性原则的指导下,从立地条件、土壤状况、生产力、群落结构、抵抗力及恢复力6个方面选取16个指标,构建了九龙山森林功能评价指标体系并确定评价标准,最后运用改进的TOPSIS法对23块样地进行了综合评价。结果表明:23块样地中,功能较好的共6个,功能中等的共10个,功能较差的共7个,说明研究区的森林功能不高,急需通过采取有效的经营措施来提高森林功能等级,改善森林状况,以实现研究区森林可持续发展的目的。从实际效果来看,改进的TOPSIS法具有一定科学性和可操作性,对北京地区森林功能评价具有参考价值。

关键词:改进的TOPSIS法;九龙山;森林功能;评价

中图分类号:S757

文献标识码:A

Assessment of Forest Function in Beijing Jiulong Mountain based on Improved TOPSIS Method

ZHANG Lian-jin, SUN Chang-zhong, XIN Xue-bing, KONG Qing-yun

(Forestry Experiment Center of North China, Chinese Academy of Forestry, Beijing 102300, China)

Abstract: Based on the principles of scientificity, systematic, relative independence and operability, 16 assessment indices were selected from the six aspects of site conditions, soil conditions, productivity, community structure, resistance and resilience, and an assessment index system of forest function in Beijing Jiulong Mountain was conducted. In the meantime, the standard of assessment indices was determined. Finally, the function status of 23 plots was evaluated by using the improved TOPSIS method. The results showed that among the 23 plots, those in the better, medium and poor function were 6, 10 and 7, respectively, indicating that the function of most of the plots were low, and were badly in need of taking effective action to raise and improve forest function status in order to achieve forest sustainable development of the study area. From the viewpoint of practical effect, it can be concluded that the improved TOPSIS method is scientific, feasible and it can provide references for forest function assessment in Beijing.

Key words: improved TOPSIS method; Jiulong Mountain; forest function; assessment

森林在涵养水源、保持水土、净化空气及生物多样性保护等方面具有重要的作用。作为森林可持续经营的组成部分和重要措施,森林功能评价问题引

起了国内外许多学者的关注,成为当前林业研究的热点和前沿。从20世纪开始,许多国家展开了对服务功能评估指标、方法及指标与功能之间的相互关

收稿日期:2014-01-21

基金项目:中国林科院基本科研业务费专项项目(CAFYBB2012004)

作者简介:张连金(1980—),女,福建三明人,博士,工程师。主要研究方向:森林经营模拟。电话:010-69826131-8013 Email:zlianjin1102

@126.com

* 通讯作者:男,研究员。主要研究方向:森林培育、森林生态。电话:010-69820651E-mail:sun61@163.com

系等方面的研究。Costanza 等^[1-2]对全球生态系统服务进行评价,标志着这一领域的研究取得突破性进展,也为生态系统服务价值的深入研究奠定了基础。随后,联合国启动了千年评估研究^[3],各国相继在国家尺度上进行了服务功能测算评估^[4-5]。国内学者在借鉴国外研究理论的基础上,采用不同的方法和指标对森林生态系统服务功能进行了评估^[6-11]。以往森林功能评价相关研究,就研究尺度来讲,主要是大尺度上的功能评价,小班尺度上的研究成果非常少^[12];就评价指标及方法来说,以物质量和价值量方法评价森林的直接价值和间接价值,且存在指标涉及多学科且无法落实到具体经营单位、数据收集困难(需要精细的或者长期的实验来获得)、常用方法调查获得的林业数据无法应用及计算复杂等问题;就评价结果来说,仅提供评价对象价值的绝对值,无法直接指导森林经营管理。对于森林经营来说,应用常用方法获得的数据来评价林分或小班的状况更具有指导意义。因此,采取一种客观、准确的评价方法对林分尺度的森林功能进行评价显得尤为紧迫。

九龙山位于北京西部,是华北石质山区的典型地理单元,特殊的地理位置和气候条件形成了半干旱区土石山区特有的森林。选择合适的方法评价九龙山森林功能将有助于正确认识半干旱区土石山地森林的功能特征,对科学管理半干旱区土石山地森林,充分发挥森林功能,实现当地生态与社会可持续发展具有重要意义。TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 法,是由 Hwang 等^[13]于 1981 年首次提出,是系统工程中有限方案多目标决策分析的一种常用技术。因该法具有思路清晰、结果合理及应用灵活等优点,近年来已被广泛用于水资源可持续利用^[14]、生态脆弱性评价^[15]、土地利用合理性^[16]及交通拥堵状态评价^[17]等实际工作。目前,应用 TOPSIS 法评价森林功能还未见报道。因此,本研究在林分尺度上,以能够反映经营效果且能够通过常用调查方法获得的森林现状指标为主,应用改进 TOPSIS 法对九龙山主要森林类型的功能进行评价,旨在为半干旱区土石山地森林的经营管理、植被恢复与重建技术的制定提供科学依据。

1 研究区概况

九龙山位于北京西郊门头沟区东南部(39°54'

~39°59' N, 115°59'~116°07' E),属太行山低山丘陵陵区,海拔为 100~997 m。山体基本呈东西走向,形成典型的大阳坡和大阴坡。山坡普遍较陡,坡度多在 25°以上^[18]。属暖温带大陆东岸半湿润季风气候,年均气温 11.8℃,年均降水量 623 mm,主要集中在 6-9 月。年均蒸发量 1 870 mm,无霜期 216 d。土壤类型属于山地褐土,土层普遍较薄,含石量高。

从区域气候条件来看,九龙山是落叶阔叶林和温性针叶林的适生区。因早期的破坏,天然植被以次生灌丛和灌草丛为主^[19]。经过 50 多年的封山育林和植树造林,植被得到不同程度的更新与恢复,形成针、阔人工林与天然次生灌丛相结合的植被类型。主要有侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、栓皮栎(*Quercus variabilis* Bl.)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr.)、白蜡(*Fraxinus chinensis* Roxb.)、黄栌(*Cotinus coggygia* Scop.)、五角枫(*Acer mono* Maxim.)、酸枣(*Ziziphus jujuba* Mill. var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow)、荆条(*Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.) Rehd.)、狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.) 和黄背草(*Themeda japonica* (Willd.) Tanaka) 等树种,更详细的资料见文献[18, 20]。

2 研究方法

2.1 基本数据获取

2012 年 8 月下旬至 11 月上旬,根据华林中心辖区内主要森林类型分布特点、自然条件和林分状况,设置 23 块标准样地。对其边界点进行 GPS 定位,并对标准地内的林分状况进行详细调查,记录样地面积、位置、海拔、坡度、坡向、坡位、树种组成及郁闭度等(表 1)。调查内容如下:

(1) 植被调查:对样地内所有乔木树种编号挂牌,测量胸径、树高及冠幅,记录种名、病虫害情况等。在样地四角及中心设置 5 个 5 m×5 m 的灌木样方,调查灌木种类、盖度、数量等指标。在各灌木调查样方中心设置 1 m×1 m 草本小样方,调查草本的种类、丛数量、盖度等指标。

(2) 幼苗更新调查:在样地四角及中心设置 5 个 2 m×2 m 的样方,按顺时针方向进行编号,记录各样方内的幼苗种类、株数等指标。

(3) 土壤调查:在每块标准地按照“S”型选取 5

表1 样地基本情况

样地 编号	样地 面积/m ²	优势树种	树种组成	起源	地点	海拔/ m	坡度/ (°)	年龄/ a	密度/ (株·hm ⁻²)	平均 胸径/cm	平均 树高/m	平均 冠幅/m
P1	225	侧柏	10 侧	人工	水文站	264.0	27	48	3 378	9.3	8.7	2.7
P2	225	侧柏	10 侧	人工	水文站	287.0	35	48	2 978	8.6	8.0	2.8
P3	225	侧柏	10 侧	人工	中心	158.0	36	42	1 644	11.7	9.9	3.7
P4	225	侧柏	10 侧	人工	中心	187.0	35	42	4 089	7.3	7.8	2.9
P5	225	侧柏	9 侧 1 山	人促	保护站	302.0	25	26	711	3.7	2.0	0.5
P6	400	油松	10 油	人工	大油松	751.3	14	43	1 375	16.6	10.5	3.2
P7	400	栓皮栎	10 栓	人工	大油松	781.0	18	43	1 625	14.2	8.7	2.7
P8	225	黄栌	10 黄	人促	中心	171.0	25	48	978	10.4	4.5	3.4
P9	100	五角枫	10 五	人工	大油松	596.0	6	30	7 100	5.9	6.4	1.8
P10	300	白蜡	6 白 3 丁 1 其它	人工	峰庵	822.0	25	37	1 267	11.0	7.7	4.3
P11	100	白蜡	9 白 1 丁	人促	峰庵	822.0	25	37	3 000	8.4	6.6	3.1
P12	225	侧柏	7 侧 3 五	人工	保护站	371.0	10	42	4 578	6.7	5.4	2.3
P13	100	五角枫	10 五	人工	九龙庙	740.2	0	25	3 000	10.3	9.2	2.9
P14	400	日本落叶松	8 日落 2 油	人工	九龙庙	691.2	0	29	2 175	12.9	8.7	4.0
P15	225	油松	8 油 2 榆 - 其它	人工	水文站	300.2	35	48	1 022	10.8	5.0	3.1
P16	300	油松	10 油	人工	九龙庙	793.7	0	49	1 200	15.6	7.9	4.3
P17	400	油松	8 油 1 樟 1 其它	人工	九龙庙	756.5	0	43	1 700	14.9	9.4	3.5
P18	400	白蜡	8 白 2 落	人工	九龙庙	760.9	0	48	2 725	10.3	10.2	3.2
P19	400	油松	7 油 2 核 1 杨	人工	九龙庙	762.6	13	47	2 300	15.1	9.2	4.3
P20	400	华北落叶松	6 华落 4 油	人工	华陀	887.0	18	48	3 150	14.0	9.2	2.6
P21	400	椴树	10 椴	人促	华陀	910.3	33	49	1 300	16.8	11.0	3.3
P22	400	华北落叶松	9 华落 1 丁	人工	华陀	924.0	18	48	1 175	14.8	9.1	2.2
P23	400	栓皮栎	10 栓	人工	华陀	817.0	5	52	1 300	17.5	11.7	3.8

注:树种组成的缩写:侧为侧柏;油为油松;栓为栓皮栎;黄为黄栌;五为五角枫;白为白蜡;华落为华北落叶松;山为山杏(*Armeniaca sibirica* (L.) Lam.);丁为北京丁香(*Syringa pekinensis* Rupr.);日落为日本落叶松(*Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.);榆为榆树(*Ulmus pumila* L.);樟为樟子松(*Pinus sylvestris* L. var. *mongolica* Litv.);核为核桃(*Juglans regia* L.);杨为山杨(*Populus davidiana* Dode.);椴为椴椴(*Tilia mandshurica* Rupr. et Maxim.)。

个样点,采用土壤剖面法取0~10,10~20,20~30 cm的土壤样品,共获得样品345个。将采集的土样自然风干、磨碎后过筛,然后装入保鲜袋用于土壤含水量(风干法)与总有机碳含量(重铬酸钾—外加热法)测定。

2.2 评价指标体系构建

对森林功能进行评价,指标体系的建立是首要和关键的步骤,指标体系建立的好坏直接关系到评价的科学性和准确性。北京山区森林主要发挥着以水源涵养和水土保持等为主的生态功能及观赏游憩为主的社会功能。基于森林结构决定功能及稳定性的机理,在坚持科学性、系统性、相对独立性及可操作性原则的指导下,整合国内外森林功能与结构的研究成果和实践经验,结合北京山区森林结构特征及相关调查数据,通过理论分析及专家咨询,从立地条件、土壤状况、生产力、群落结构、抵抗力及恢复力6个方面,选取16项评价指标,构建九龙山森林功能评价指标体系(表2),其中,部分指标需要通过计算获得,如生物量需将材积与生物量转换因子^[21]相乘获得;断面积组成由各树种的

断面积组成与顶级适应度^[22]相乘累加而得;不健康林木比例主要是指具有枯梢、断梢、病害和虫害等特征的林木占总株数的比例;火险指数由各树种的断面积组成与火险燃烧等级值^[23]相乘累加而得。

表2 森林功能评价指标体系及标准

指标	代码	标准
生物量	B ₁	越大越好
郁闭度	B ₂	0.7 ≤ B ₂ ≤ 0.8
株数	B ₃	800 株·hm ⁻² ≤ B ₃ ≤ 1 200 株·hm ⁻²
断面积组成	B ₄	越大越好
偏度	B ₅	绝对值越小越好
年龄	B ₆	北京市二类调查中各树种(组)基准年龄
群落层次结构	B ₇	越大越好
Simpson 多样性指数	B ₈	越大越好
不健康林木比例	B ₉	越小越好
火险指数	B ₁₀	越小越好
更新幼苗	B ₁₁	B ₁₁ ≥ 3 000 株·hm ⁻²
坡度	B ₁₂	越小越好
枯落物厚度	B ₁₃	B ₁₃ ≥ 5 cm
土层厚度	B ₁₄	越大越好
有机质含量	B ₁₅	越大越好
土壤水分	B ₁₆	越大越好

2.3 评价方法

针对传统的 TOPSIS 法在权重确定^[24-25]和距离计算^[26]上存在的缺陷,本文采用改进的 TOPSIS 法对森林功能进行评价,其改进主要体现在通过构造多目标规划模型和作 Lagrange 函数来确定评价指标权重和利用垂面距离代替欧式距离。

2.3.1 建立评价矩阵 A 假设有 m 个评价单元,每一评价单元有 n 个评价指标,则评价矩阵 A 为:

$$A = (a_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.3.2 建立标准化判断矩阵 R 由于所选评价指标因评价单位不同不具有可比性,为使各指标具有可比性及可计算性,应对其进行无量纲化处理,即标

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{\max\{q_1^j - a_{ij}, a_{ij} - q_2^j\}}{\max\{q_1^j - \min_j a_{ij}, \max_j a_{ij} - q_2^j\}} & \text{if } a_{ij} \notin [q_1^j, q_2^j] \\ 1, & \text{if } a_{ij} \in [q_1^j, q_2^j] \end{cases} \quad (6)$$

2.3.3 确定指标权重 W 通过构造多目标规划模型和作 Lagrange 函数来确定评价指标权重。

第 j 项指标的权重 w_j 为:

$$w_j = \frac{\mu_j}{\sum_{j=1}^n \mu_j}, W = (w_j)_{1 \times n} \quad (7)$$

式中: $\mu_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^m ((1 - r_{ij}^2) + r_{ij}^2)}$, 且满足 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$,

0 ≤ w_j ≤ 1 (j = 1, 2, …, n), 其详细论证过程见文献[16]。

2.3.4 建立加权矩阵 Z 利用得到的权重及标准化判断矩阵 R 得到加权矩阵。

$$Z = (z_{ij})_{m \times n} = W \cdot R = w_j r_{ij} \quad (8)$$

2.3.5 确定正理想解 S⁺ 与负理想解 S⁻ 第 j 项指标的理想解为:

$$S_j^+ = \begin{cases} \max_{1 \leq i \leq m} \{z_{ij}\}; & \text{越大越优型} \\ \min_{1 \leq i \leq m} \{z_{ij}\}; & \text{越小越优型} \end{cases} \quad (9)$$

$$S_j^- = \begin{cases} \min_{1 \leq i \leq m} \{z_{ij}\}; & \text{越大越优型} \\ \max_{1 \leq i \leq m} \{z_{ij}\}; & \text{越小越优型} \end{cases} \quad (10)$$

为简化计算,坐标原点将平移到理想解点,平移矩阵为: T = (t_{ij})_{m × n}

式中:

$$t_{ij} = z_{ij} - S_j^+ \quad (11)$$

准化,利用相对隶属度公式对上面的矩阵 A 进行标准化处理,得到相对隶属度矩阵 R。

为了清除不同物理量纲对决策结果的影响,可按下述公式将决策矩阵 A = (a_{ij})_{m × n} 转变为规范化矩阵 R = (r_{ij})_{m × n}。

对于效益型指标:

$$r_{ij} = (a_{ij} - \min_j a_{ij}) / (\max_j a_{ij} - \min_j a_{ij}) \quad (2)$$

对于成本型指标:

$$r_{ij} = (\max_j a_{ij} - a_{ij}) / (\max_j a_{ij} - \min_j a_{ij}) \quad (3)$$

对于固定型指标:

$$r_{ij} = 1 - |a_{ij} - \alpha_j| / \max_j |a_{ij} - \alpha_j| \quad (4)$$

对于偏离型指标:

$$r_{ij} = \frac{(|a_{ij} - \beta_j| - \min_j |a_{ij} - \beta_j|)}{(\max_j |a_{ij} - \beta_j| - \min_j |a_{ij} - \beta_j|)} \quad (5)$$

对于区间型指标:

此时,负理想解为 S_j⁻ = t_{kj}, 满足 |t_{kj}| ≥ |t_{ij}|, 1 ≤ k ≤ m。

2.3.6 计算垂面距离 d_j 按欧氏距离对方案进行评价的结果有时不能完全反映出各方案的优劣性^[26-27],因此,采用“垂面距离”来判定各方案与理想解的贴近程度。

根据“垂面距离”的定义,各方案与理想解之间的“垂面距离” d_j 可以表示为:

$$d_j = |S^- \cdot T_i| = \sum_{j=1}^n (S_j^- t_{ij}) \quad (12)$$

d_j 值表明了方案接近理想解的程度, d_j 值越小,方案越优。

2.3.7 森林功能等级划分 利用与理想解的垂面距离通过聚类分析进行功能等级划分。聚类分析通过编写代码在 Matlable 中实现。

3 结果与分析

3.1 构建标准化判断矩阵

首先根据构建的指标体系及其意义得到各样地各评价指标值,形成功能评价矩阵 A,根据各指标对应类型按式(2)~(6)进行标准化处理,得到标准化判断矩阵 R。

3.2 评价指标的权重与正、负理想解

在构造多目标规划模型和作 Lagrange 函数的

基础上,根据式(7)得到各评价指标的权重。由标准化判断矩阵 R 与得到的权重 W ,根据式(8)构建加权矩阵 Z ;再由式(9)~(11)得到正、负理想解。从表3可知:从权重的分布来看,对森林功能综合评价向量影响最大的评价指标为偏度,权重为0.077 31;其次分别为有机质含量、土壤水分和生物量,权重都大于0.070 00;最小的为不健康林木比例,权重为0.048 45,且最大值与最小值在第1位有效数字就存在差异,说明这些指标对于森林功能大小的作用差异明显。从评价指标的正、负理想解的分布来看,正理想解都为0除 Simpson 多样性指数外,负理想解的绝对值由评价指标的权重来决定。

表3 评价指标的权重与正、负理想解

指标	权重(W)	S^+	S^-
生物量(B_1)	0.070 41	0	-0.070 41
郁闭度(B_2)	0.060 38	0	-0.060 38
株数(B_3)	0.059 56	0	-0.059 56
断面积组成(B_4)	0.069 12	0	-0.069 12
偏度(B_5)	0.077 31	0	0.077 31
年龄(B_6)	0.059 11	0	-0.059 11
群落层次结构(B_7)	0.053 07	0	-0.053 07
Simpson 多样性指数(B_8)	0.058 49	0	-0.029 83
不健康林木比例(B_9)	0.048 45	0	0.048 45
火险指数(B_{10})	0.055 71	0	0.055 71
更新幼苗(B_{11})	0.052 18	0	-0.052 18
坡度(B_{12})	0.063 04	0	0.063 04
枯落物厚度(B_{13})	0.064 00	0	-0.064 00
土层厚度(B_{14})	0.061 88	0	-0.061 88
有机质含量(B_{15})	0.074 20	0	-0.074 20
土壤水分(B_{16})	0.073 08	0	-0.073 08

3.3 森林功能等级

根据式(12)得到各评价单元与理想解的垂面距离 d_j ,再根据垂面距离进行聚类。通过不同方法之间的比较,最后得到稳定的聚类结果。

从垂面距离来看(图1),各样地与理想解之间距离全部位于0.026~0.042,其中,P23号栓皮栎林样地的距离最小,为0.027,表明其功能最好;其次为P20号华北落叶松与油松混交林样地,距离为0.027;距离最大的为P9号五角枫纯林样地,为0.04,表明其功能最差。从聚类结果(图2)来看:属于I级的样地有6块(P6、P7、P20、P21、P22及P23),其优势树种主要为椴树、栓皮栎及华北落叶松;属于II级的样地有10块(P3、P8、P10、P13、P14、P15、P16、P17、P18及P19),其优势树种主要为油松、黄栌、日本落叶松、白蜡及五角枫;属于III级的样地有7块(P1、P2、P4、P5、P9、P11及P12),其优势树

种主要为侧柏。从聚类分布区域来看,华垞与大油松2个区域都属于I级,森林功能较好,这与该区域较远、人为破坏较少有关,其中,大油松区五角枫林样地(P9)因密度较大、更新较少、林下无植被,而属于III级,功能较差。九龙庙区森林都属于II级,森林功能中等。保护站区森林主要是侧柏林,属于III级,功能较差。水文站、中心及峰庵II级与III级共存,其中属于III级的优势树种为侧柏。

总之,九龙山的森林功能总体处于中等偏下状态,这与该区森林起源有直接关系,它主要是20世纪50、60年代通过封山育林和植树造林形成的针、阔人工纯林,具有树种单一、结构不合理、密度大及生物多样性差等特征,因此,整体功能较低。应及时确定影响功能等级的主导因子,对林分加以经营和管理,提高林分的功能。

4 结论与讨论

评价指标体系的构建是森林功能评估的基础。本研究基于森林结构决定功能及稳定性的机理,从立地条件、土壤状况、生产力、群落结构、抵抗力及恢复力6个方面,选取16项评价指标,构建九龙山森林功能评价指标体系。该指标体系能够准确、全面地描述林分状态,同时由于吸收生物量因子,更加综合了对功能的解释。

指标基准值的确定直接影响评价结果。从前人^[22,28]的研究可知,大多根据研究者自身的主观经验确定基准值,人为影响较强,难免失去客观性。本文通过引入国家有关标准、科研标准以及行业和地方相关规定来确定基准值,更具客观性与说服力。

本研究基于改进的TOPSIS法对九龙山森林功能进行评价,结果表明:P23号栓皮栎林样地功能最好,其次为P20号华北落叶松与油松混交林样地,而P9号五角枫纯林样地功能最差。通过对垂面距离进行聚类,将23块样地分为3个类型(功能较好、功能中等和功能较差),结果表明:九龙山区的森林功能大体处于中等状态。造成功能较低的原因有:自然地理条件较差、植被类型及结构不合理等造成林分生长不良;人工抚育重视不够,当森林被划为生态公益林后,基本不采取抚育措施。

本文研究结果表明:改进的TOPSIS法对数据分布、样本量大小及评价指标的选择没有严格的限制,具有应用灵活、操作简便、结果直观、科学等特点,

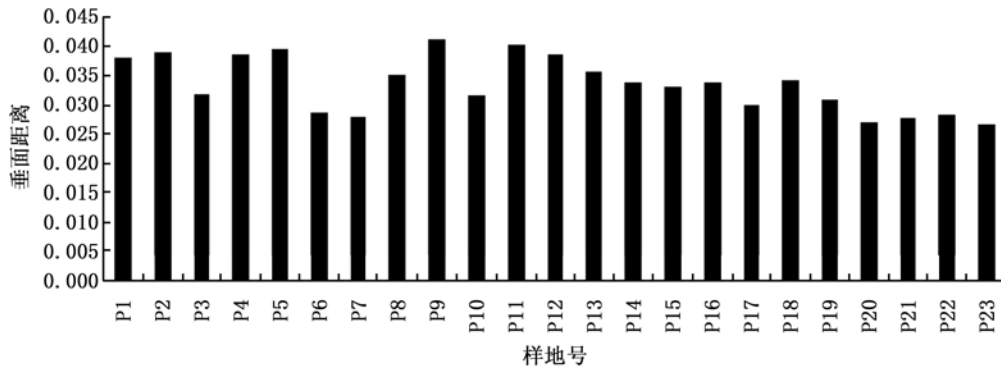


图 1 样地垂面距离

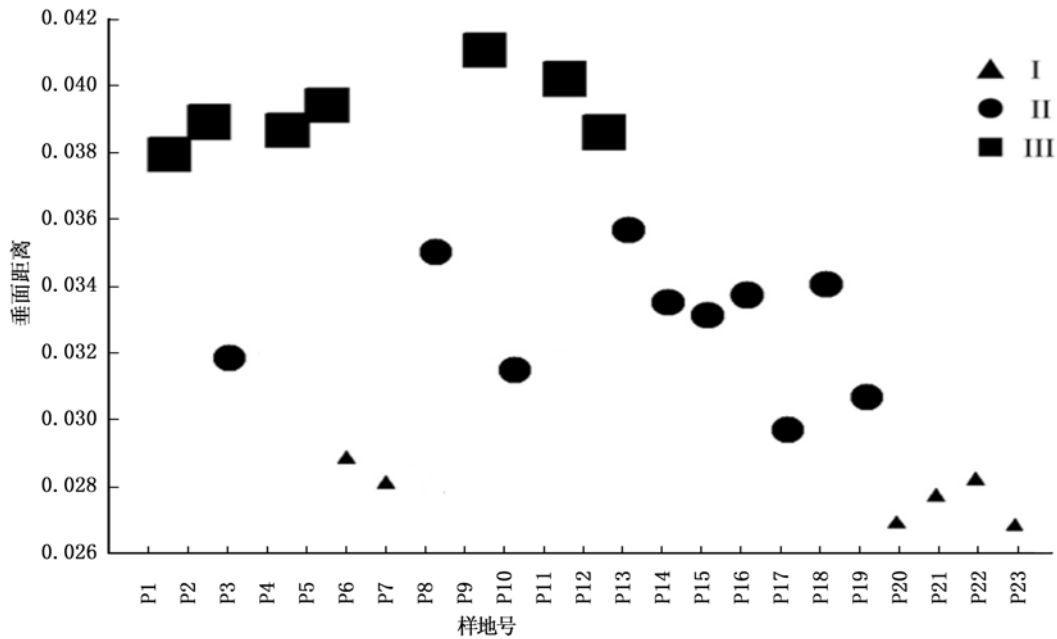


图 2 样地聚类结果

能精确反映各评价对象的差异,在森林功能多指标综合评价中有较大的应用价值;但该方法也有其局限性,受异常值的影响较大。因此,在分析评价时,要尽可能的减少异常值,达到提高评价结果的科学性。

与国内进行的大多数森林功能评价一样,本研究仅对森林功能进行了静态的评价,且评价的结果只说明参与评价的各森林功能的相对强弱;但该研究是在林分尺度上进行的评价,其结果有利于更直观的认识和了解森林在林分尺度上的功能规律,可为区域的森林经营管理、植被恢复与重建技术的制定提供科学依据。

参考文献:

[1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387: 253 - 260.
 [2] Costanza R. Ecosystem services: Multiple classification systems are

needed[J]. Biological Conservation, 2008, 141(2): 350 - 352.
 [3] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: General Synthesis[M]. Washington, DC: Island Press, 2010: 1 - 18.
 [4] Adger N W, Brown K, Cervigni R, et al. Total economic value of forests in Mexico[J]. Ambio, 1995, 24(5): 286 - 296.
 [5] UK NEA. Th UK national ecosystem assessment technical report: synthesis of the key findings [M]. Cambridge: UNEP-WCMC, 2011:5 - 84.
 [6] 段晓峰, 许学工. 区域森林生态系统服务功能评价——以山东省为例[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2006, 42(6): 751 - 756.
 [7] 王 兵, 马向前, 郭 浩, 等. 中国杉木林的生态系统服务价值评估[J]. 林业科学, 2009, 45(4): 124 - 130.
 [8] 王 兵, 任晓旭, 胡 文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估[J]. 林业科学, 2011, 47(2): 145 - 153.
 [9] 白 杨, 欧阳志云, 郑 华, 等. 海河流域森林生态系统服务功能评估[J]. 生态学报, 2011, 31(7): 2029 - 2039.
 [10] 牛 香, 宋庆丰, 王 兵, 等. 吉林省森林生态系统服务功能

- [J]. 东北林业大学学报,2013,41(8):36-41.
- [11] 刘勇,李晋昌,杨永刚. 基于生物量因子的山西省森林生态系统服务功能评估[J]. 生态学报,2012,32(9):2699-2706.
- [12] 殷鸣放,郑小贤,殷炜达. 森林多功能评价与表达方法[J]. 东北林业大学学报,2012,40(6):23-26.
- [13] Hwang C L, Yoon K. Multiple attribute decision making methods and applications[M]. Berlin: Springer Heidelberg, 1981.
- [14] 陈杰,朱丽倩,吴向炜. 改进的 TOPSIS 在区域水资源可持续利用综合评价中的应用研究[J]. 武汉大学学报:工学版, 2008,41(S):303-306.
- [15] 张振东,潘妮,梁川. 基于改进 TOPSIS 的长江黄河源区生态脆弱性评价[J]. 人民长江,2009,40(16):81-84.
- [16] 杨东,郑凤娟,潘竞虎,等. 改进的 TOPSIS 法在土地利用合理性评价中的应用[J]. 土壤通报,2012,43(1):120-124.
- [17] Yu J F, Wang L, Gong X L. Study on the status evaluation of urban road intersections traffic congestion base on AHP-TOPSIS model[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2013, 96: 609-616.
- [18] 兰再平. 北京九龙山地区的植被及其对生境类型的指示意义[J]. 植物生态学与地植物学报,1989,13(3):258-269.
- [19] 李清河,杨立文,崔丽娟. 北京九龙山封育植被群落变化的研究[J]. 林业科学研究,2002,13(3):323-331.
- [20] 于宁楼. 九龙山不同森林类型立地长期生产力研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院,2001.
- [21] 仝慧杰. 森林生物量遥感反演建模基础与方法的研究[D]. 北京:北京林业大学,2007.
- [22] 庄健荣,张志翔. 结构—多样性指数在八达岭地区森林健康评价中的应用[J]. 中国农学通报,2008,24(8):162-166.
- [23] 王栋. 中国森林火险调查与区划[M]. 北京:中国林业出版社,2000.
- [24] Wang T C, Lee H D. Developing a fuzzy TOPSIS approach based on subjective weights and objective weights[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36: 8980-8985.
- [25] Xu Z S, Zhang X L. Hesitant fuzzy multi-attribute decision making based on TOPSIS with incomplete weight information[J]. Knowledge-Based Systems, 2013, 52(1): 53-64.
- [26] Chang C H, Lin J J, Lin J H, et al. Domestic open-end equity mutual fund performance evaluation using extended TOPSIS method with different distance approaches[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37: 4642-4649.
- [27] Yue Z L. An extended TOPSIS for determining weights of decision makers with interval numbers[J]. Knowledge-Based System, 2011, 24(1): 146-153.
- [28] 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.