

## 基于 AHP 的高黎贡山国家级自然保护区保山片区生态质量评价

周应再<sup>1</sup>, 余新林<sup>1</sup>, 徐聪丽<sup>2</sup>, 易传辉<sup>3</sup>, 楚原梦冉<sup>2\*</sup>

(1. 云南高黎贡山国家级自然保护区保山管护局腾冲分局, 云南腾冲

679100; 2. 高黎贡山国家级自然保护区保山管护局, 云南保山 678000; 3. 西南林业大学, 云南昆明 650224)

**摘要** 根据保护区类型自然保护区生态评价指标体系, 以生物多样性、森林生态景观价值、生态旅游价值、森林生态教育科研价值作为准则层, 选择多样性、稀有性、脆弱性、自然性、典型性、面积适宜性、人类干扰作为评价层指标, 运用层次分析法(AHP)对高黎贡山国家级自然保护区保山片区进行生态质量评价。综合评价结果表明: 该保护区生态质量指数为 0.944 2, 说明高黎贡山国家级自然保护区保山片区整体生态质量很好, 保护价值极高, 属于优先保护区域。该评价结果为高黎贡山国家级自然保护区自然资源管护提供了科学依据。

**关键词** 森林类型; 自然保护区; 层次分析法; 生态质量评价

中图分类号 S 759.9 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)21-0145-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.21.035



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Ecological Quality Assessment on AHP Method in Gaoligongshan National Nature Reserve, Baoshan

ZHOU Ying-zai<sup>1</sup>, YU Xin-lin<sup>1</sup>, XU Cong-li<sup>2</sup> et al (1. Tengchong Branch of Gaoligongshan National Natural Reserve, Tengchong, Yunnan 679100; 2. Administration Bureau of the Natural Reserve of Gaoligongshan, Baoshan, Yunnan 678000)

**Abstract** The assessment of the ecological quality of Gaoligongshan Nature Reserve, Baoshan District was conducted based on the type of nature reserve and the nature reserve ecological evaluation index. An analytic hierarchy process (AHP) has been used for the analysis based on four aspects of the nature reserve's ecosystem functions, including value of biodiversity conservation, improvement in ecological condition, scientific research and eco-tourism value. A further seven evaluation indicators were selected (including diversity, rareness, vulnerability, naturalness, representativeness, suitable area and human impact) to determine the weighting of each evaluation factor, and to develop a structure matrix. The results of the evaluation for Gaoligongshan National Nature Reserve, Baoshan District showed a comprehensive index of 0.944 2, which represents satisfactory ecological quality and extraordinary conservation value. The results of this assessment provide a strong scientific basis for supporting effective ongoing protection of the biodiversity of Gaoligongshan Nature Reserve.

**Key words** Forest type; Nature reserves; Analytic hierarchy process; Ecological quality assessment

生态质量评价是在特定的时空范围通过构建合理的指标体系及采用科学的评价方法, 对某一区域生态质量的优劣程度进行定性或定量的研判, 所反映出的是该区域的环境要素对自然和人类社会可持续发展的影响<sup>[1-4]</sup>。在评价指标和方法的选择上应具有代表性、可比性及可操作性等特点。目前应用较多的生态质量评价方法有层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)、指数评价法、模糊评价法、人工神经网络分析法等<sup>[5-10]</sup>。

自然保护区是生物多样性最丰富、物种分布最集中的区域, 它既是自然资源与生物多样性的重要载体, 又是开展科学研究和生态环境宣传教育的重要基地<sup>[11-12]</sup>。为充分发挥其生态服务功能, 需要采取科学有效的管理措施来保护其自然生态环境, 其中生态质量评价工作是保护区管理工作中至关重要的环节<sup>[6,8]</sup>, 能够全面、准确地评价保护区自然生态质量, 不仅是保护区实现科学规划、保护与管理的基础, 还是维持区域生态平衡, 维护国家生态安全关键内容之一<sup>[13-16]</sup>。

高黎贡山国家级自然保护区属森林生态系统类型自然保护区<sup>[17]</sup>, 区内的物种丰富度和特有化程度均位居世界大陆区系的前列, 有着丰富的自然资源和文化价值, 2013 年被中国生物多样性委员会确认为“具有国际意义的陆地生物多

样性关键地区”<sup>[18-19]</sup>。同时也是云南省面积最大的自然保护区, 由北、中、南互不相连的 3 段组成, 分属不同的管护局管辖。其中南段位于云南保山市隆阳区和腾冲市境内, 均属于保山管护局。近年来, 随着人口的增加以及气候变化与极端天气所带来的冲击, 使得保护区生态环境受到的压力与日俱增。因此, 在该区域内开展生态质量评价研究, 不仅能反映出保护区当前保护及管理效能的高低, 同时更可以对未来保护区生态环境的变化作出预测, 对实现保护区的可持续发展具有重要意义。笔者选择高黎贡山国家级自然保护区南段为研究区域, 通过筛选代表性强、可比性高、基本参数易于获取的评价指标, 运用层次分析法(AHP)构建评价模型, 对该区域的生态质量进行综合分析, 并根据评价结果回溯具有重要影响的指标因子, 旨在帮助管理部门及时了解区域生态环境的核心问题, 完善管理体系, 从而能进一步提高区域整体的生态系统健康水平。

### 1 高黎贡山国家级自然保护区保山片区概况

云南高黎贡山国家级自然保护区, 位于云南西部中缅边境地区, 是怒江和伊洛瓦底江的分水岭。保山管护局管辖面积为 81 621 hm<sup>2</sup>, 其中, 隆阳管护分局管护面积为 39 220 hm<sup>2</sup>, 腾冲管护分局管护面积为 42 401 hm<sup>2</sup>。地理位置为 98.63°~98.75°E, 26.14°~24.92°N。保护区具有我国西部型季风气候特征, 气象要素垂直变化明显, 从河谷到山顶依次出现亚热带、温带、亚寒带、寒带 4 个垂直气候带。气温东坡比西坡略高, 降水量西坡丰富, 年均降雨量为 1 668~3 600 mm。区内植被从低海拔至高海拔分布有热带季雨林、

**基金项目** 国家级自然保护区生物多样性监测项目(DEB-0103795)。  
**作者简介** 周应再(1977—), 女, 云南腾冲人, 工程师, 从事资源监测与生物多样性保护研究。\* 通信作者, 博士, 从事野生动植物保护与利用研究。

**收稿日期** 2021-02-08; **修回日期** 2021-03-08

亚热带常绿阔叶林、落叶阔叶林、温凉性针叶林、寒温性针叶林、寒温性灌丛、高山草甸等山地垂直植被类型,分布有半常绿季雨林、河谷稀树灌木草丛、暖性针叶林、暖性竹林、季风常绿阔叶林、半湿润常绿阔叶林、中山湿性常绿阔叶林、温凉性针叶林、山顶苔藓矮林、寒温性针叶林、寒温性竹林、寒温性灌丛、寒温性草甸等植被亚型<sup>[20-21]</sup>。

2 研究方法

层次分析法是由萨蒂(Saaty T L)于 20 世纪 70 年代提出的一种定性定量相结合的多目标决策分析方法。在国内外广泛应用于生态质量、旅游资源、农业经济评价等方面<sup>[22-24]</sup>。参照我国关于自然保护区生态评价的原则和指标体系,运用层次分析法确定各指标的权重,对高黎贡山国家级自然保护区保山片区的生态质量进行评价。

2.1 评价指标体系及赋值标准 通过资料整理、文献分析、实地调研等方法,依据《自然保护区自然生态质量评价技术规程》(LY/T 1813—2009)中森林生态系统类型自然保护区自然生态质量评价的原则<sup>[25]</sup>,结合高黎贡山国家级自然保护区的区域特征和保护对象,以高黎贡山保护区保山片区的自然生态质量评价作为目标层(A),以保护区的生物多样性保护(B<sub>1</sub>)、森林景观生态改善(B<sub>2</sub>)、森林生态教育科研价值(B<sub>3</sub>)、生态旅游价值(B<sub>4</sub>) 4 项作为准则层(B),选取生物多

样性(C<sub>1</sub>)、稀有性(C<sub>2</sub>)、脆弱性(C<sub>3</sub>)、自然性(C<sub>4</sub>)、典型性(C<sub>5</sub>)、面积适宜性(C<sub>6</sub>)、人类干扰(C<sub>7</sub>) 7 项评价指标作为指标层(C),建立高黎贡山保护区生态质量评价指标体系并确定评价标准和赋值<sup>[23]</sup>。

2.2 运用层次分析法确定评价指标权重

2.2.1 建立层次结构模型。根据保护区生态质量评价技术规程,将 7 个一级指标进一步划分为 14 个二级指标,将每个二级评价指标划分为 3~4 个等级,并确定相应评价标准和赋值分<sup>[26-27]</sup>。

2.2.2 构建判断矩阵。通过向 8 位长期从事自然保护区研究工作的科研专家及保护区管理人员发放调查问卷,依照 1~9 标度法,判断指标层所有评价指标对准则层某一指标相对的重要性来构建判断矩阵<sup>[23]</sup>。判断矩阵见表 1、2。

表 1 准则层各指标判断矩阵

Table 1 Judgment matrix of each index of criterion layer

A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>
B <sub>1</sub>	1	5	5	4
B <sub>2</sub>	1/5	1	3	3
B <sub>3</sub>	1/5	1/3	1	1
B <sub>4</sub>	1/4	1/3	1	1

表 2 各评价指标判断矩阵

Table 2 Judgment matrix of each evaluation index

指标 Index	B <sub>1</sub>							B <sub>2</sub>						
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>
C <sub>1</sub>	1	1/3	1	4	1/2	5	9	1	1/3	1/3	1/6	1/5	1/4	5
C <sub>2</sub>	3	1	3	4	2	5	9	3	1	1	1/4	1/3	1	5
C <sub>3</sub>	1	1/3	1	1	1/3	2	6	3	1	1	1/3	1/3	1	4
C <sub>4</sub>	1/4	1/4	1	1	1/5	2	6	6	4	3	1	2	4	7
C <sub>5</sub>	2	1/2	3	5	1	5	7	5	3	3	1/2	1	1/3	5
C <sub>6</sub>	1/5	1/5	1/2	1/2	1/5	1	9	4	1	1	1/4	3	1	3
C <sub>7</sub>	1/9	1/9	1/6	1/6	1/7	1/9	1	1/5	1/5	1/4	1/7	1/5	1/3	1

  

指标 Index	B <sub>3</sub>							B <sub>4</sub>						
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>
C <sub>1</sub>	1	5	1	4	5	4	6	1	1	2	1	1/3	7	4
C <sub>2</sub>	1/5	1	1/3	4	2	1	2	1	1	1/2	4	1/3	9	7
C <sub>3</sub>	1	3	1	4	5	3	3	1/2	2	1	1/2	1/3	6	5
C <sub>4</sub>	1/4	1/4	1/4	1	1/2	1/3	3	1	1/4	2	1	1/4	7	9
C <sub>5</sub>	1/5	1/2	1/5	2	1	1	2	3	3	3	4	1	7	9
C <sub>6</sub>	1/4	1	1/3	3	1	1	2	1/7	1/9	1/6	1/7	1/7	1	1
C <sub>7</sub>	1/6	1/2	1/3	1/3	1/2	1/2	1	1/4	1/7	1/5	1/9	1/9	1	1

2.2.3 确定各要素的权重。根据判断矩阵,利用和积法,借助 yaahp 软件(v 12.5)计算各判断矩阵的特征向量及最大特征根 λ<sub>max</sub>,特征向量为各评价要素的重要性排序,归一化后即即为权重分配<sup>[28-31]</sup>。

2.2.4 一致性检验。当 λ<sub>max</sub> ≠ n(n 为判断矩阵阶数)时,判断矩阵一致性指标为 CI=λ<sub>max</sub>-n/n-1;RI 为判断矩阵的平均随机一致性指标,当 RI < 0.10 时,判断矩阵具有满意的一致性,否则需要调整判断矩阵<sup>[8,30]</sup>。

2.3 综合评价 综合评价计算采用多目标线性加权法<sup>[3,5]</sup>,

其计算公式为

$$S = \sum_{i=1}^4 (\sum_{j=1}^n Z_j W_{ij}) \times W_i$$

式中,S 为综合评价指数,Z<sub>j</sub> 为第 j 项评价指标的赋值;W<sub>i</sub> 为准则层中第 i 项的权重;W<sub>ij</sub> 为准则层中第 i 项第 j 指标的权重。

2.4 保护区生态质量评价等级划分 根据《自然保护区自然生态质量评价技术规程》对保护区生态质量综合评价进行等级划分:0.86 ≤ S ≤ 1.00,生态质量很好;0.71 ≤ S ≤ 0.85,生态质量较好;0.51 ≤ S ≤ 0.70,生态质量一般;0.36 ≤ S ≤

0.50, 生态质量较差;  $S \leq 0.35$ , 生态质量很差<sup>[25]</sup>。

### 3 结果与分析

**3.1 评价指标权重及一致性检验** 依据评价指标重要性标度法原则, 对任意 2 个指标相对重要性进行逐一比较。根据

专家意见确定其相对重要性。分别建立总体目标层(A)对应的准则层(B)判断矩阵和准则层对应指标层(C)的判断矩阵, 计算各矩阵特征向量及各矩阵最大特征值  $\lambda_{\max}$ , 结果表明, 一致性检验结果  $CR < 0.10$  (表 3)。

表 3 判断矩阵计算结果

Table 3 Calculation result of judgment matrix

矩阵 Matrix	权重 Weight	$\lambda_{\max}$	CI	RI	CR
A-B	[0.575 1, 0.226 1, 0.095 6, 0.103 2]	4.199 5	0.066 5	0.911	0.073 < 0.10
B <sub>1</sub> -C	[0.166 8, 0.318 0, 0.103 6, 0.080 7, 0.243 3, 0.067 2, 0.020 4]	7.632 2	0.105 3	1.350	0.078 < 0.10
B <sub>2</sub> -C	[0.059 0, 0.110 6, 0.110 3, 0.338 6, 0.196 1, 0.155 0, 0.030 3]	7.802 0	0.133 6	1.350	0.098 < 0.10
B <sub>3</sub> -C	[0.328 3, 0.114 5, 0.266 5, 0.065 7, 0.077 5, 0.091 6, 0.055 8]	7.572 7	0.095 4	1.350	0.070 < 0.10
B <sub>4</sub> -C	[0.146 5, 0.181 6, 0.132 6, 0.147 3, 0.339 8, 0.025 5, 0.026 7]	7.728 7	0.121 5	1.350	0.089 < 0.10

**3.2 指标层对应的单项指标评价结果** 根据《高黎贡山国家级自然保护区科考报告(1995)》及日常科研监测数据, 对各单项指标给出相应评价, 具体赋值如下。

**3.2.1 生物多样性。**因特殊的地理位置和自然环境, 保护区内孕育了丰富的植物资源。据调查, 按《中国植被》分类系统, 高黎贡山国家级自然保护区有 7 个植被类型, 占云南的 83.3%, 占全国的 34.5%; 有 16 个植被亚型, 占云南的 47.1%, 占全国的 25.8%; 有 68 个群系, 占云南的 39.5%, 占全国的 12.1%。高等植物 264 科 1 361 属 5 726 种及变种, 其中蕨类植物 46 科 110 属 593 种及变种, 种子植物有 218 科 1 251 属 5 133 种及其变种<sup>[32-33]</sup>。同时, 保护区目前已知哺乳类动物有 205 种, 占云南的 52.0%, 占全国的 30.9%; 鸟类 525 种, 占云南的 52.9%, 占全国的 35.3%; 两栖动物 52 种, 占云南的 20.6%, 占全国的 7.5%; 爬行类动物 76 种, 占云南的 37.2%, 占全国的 14.9%; 鱼类 49 种, 占云南的 12.3%, 占全国的 1.8%; 昆虫 1 720 种, 占云南的 8.5%, 占全国的 4.2%, 其中大型蛾类 5 科 536 属 1 005 种<sup>[34]</sup>。多样性得分 1.00。

**3.2.2 典型性。**保护区位于云南省西部和西北部, 北接青藏高原, 南衔中印半岛, 东邻云贵高原, 西毗印缅山地, 是我国国家级自然保护区、三江并流世界自然遗产、世界人与生物圈保护区的重要组成部分。区内生物物种呈现从东向西、从北向南或相反方向过渡与相互融合的特征, 是具有国际重要意义的 A 级保护区。其丰富的生物多样性在我国乃至世界保护领域具有较高影响力。典型性得分 1.00 分。

**3.2.3 稀有性。**保护区珍稀濒危动植物种类繁多, 分布有国家重点保护野生植物 35 种, 其中国家 I 级重点保护野生植物有喜马拉雅红豆杉(*Taxus wallichiana*)、大树杜鹃(*Rhododendron protistum*)、菝葜苏铁(*Cycas pectinata*)、光叶珙桐(*Davidia involucreta*)、长蕊木兰(*Alcimandracathcartii*)等 6 种; 国家 II 级重点保护野生植物有桫欏(*Alsophila spinulosa*)、油麦吊云杉(*Picea brachytyla*)、澜沧黄杉(*Pseudotsuga forrestii*)、贡山三尖杉(*Cephalotaxus lanceolata*)、云南榧树(*Torreya yunnanensis*)等 30 种。分布有国家重点保护野生动物 84 种, 其中国家 I 级重点保护野生动物有高黎贡白眉长臂猿

(*Hoolock tianxing*)、菲氏叶猴(*Trachypithecus phayrei*)、林麝(*Moschus berezovskii*)、白尾梢虹雉(*Lophophorus sclateri*)等 21 种, 国家 II 级重点保护野生动物有猕猴(*Macaca mulatta*)、小熊猫(*Ailurus fulgens*)、红隼(*Falco tinnunculus*)、红腹角雉(*Tragopan temminckii*)等 46 种; 而被濒危野生动植物种国际贸易公约(CITES)附录 I 收录的野生动物有 9 种, CITES 附录 II 收录的有 10 种<sup>[20]</sup>。稀有性得分 1.00 分。

**3.2.4 自然性。**保护区生境状况完好且区内未受侵扰, 核心区 and 缓冲区无人居住, 保持原始状态, 自然生境完好。区内森林覆盖率高达 93.7%, 天然林占保护区面积的 84.7%, 人工林占保护区面积的 9.0%。随着保护管理工作的不断深入以及社会公众生态保护意识的不断提高, 保护区森林生态系统得到了良好的保护, 区内森林覆盖率也长期维持在较高水平。自然性加权得分为 0.88 分。

**3.2.5 面积适宜性。**保护区面积 81 621  $\text{hm}^2$ , 按功能区划分: 核心区面积为 40 032  $\text{hm}^2$ , 试验区面积为 41 589  $\text{hm}^2$ , 为了严格管理未设缓冲区。根据保护区生态功能区域分布和主要保护对象的分布及活动特点, 目前保护区的面积能有效维持生态系统的结构、功能和主要保护对象生态安全。同时, 保护区开展的宣教活动也对周边社区起到积极的影响, 因此, 不会因社区发展而对保护区构成威胁。面积适宜性得分 1.00。

**3.2.6 脆弱性。**区内生态系统较为成熟, 部分区域通过生态恢复, 生态系统原有的品质能够得到恢复, 但关键物种, 如高黎贡白眉长臂猿(*Hoolock tianxing*)、大树杜鹃(*Rhododendron protistum*)等, 存在种群数量少、生活力较弱、生境特化的现象, 轻度的人为干扰就可能导导致这些物种灭绝, 表现出一定的脆弱性。因此, 脆弱性加权得分为 0.66。

**3.2.7 人为干扰。**保护区地形险峻, 受到人为干扰的强度远不及平原地区, 区内无任何资源开发行为。而保护区周边开发程度较低, 但外围区域被开发为生态旅游区的意愿较强。因此, 人为干扰加权得分 0.76。

**3.3 综合评价** 根据各评价矩阵计算结果(表 3), 准则层中按重要性排序: 生物多样性保护  $B_1(0.575 1) >$  森林景观生态改善  $B_2(0.226 1) >$  生态旅游价值  $B_4(0.103 2) >$  森林生态

教育科研价值  $B_3(0.0956)$ ; 指标层中按重要性排序: 稀有性  $C_2(0.2372) >$  典型性  $C_5(0.2261) >$  生物多样性  $C_1(0.1556) >$  自然性  $C_4(0.1260) >$  脆弱性  $C_3(0.1233) >$  面积适宜性  $C_6(0.0558) >$  人类干扰  $C_7(0.0202)$ 。生态质量综合评价指数为 0.9442(表 4)。对照《自然保护区自然生态质量评价技术规程》(LY/T 1813—2009)中评定等级的划分,高黎贡山国家级自然保护区作为中国森林系统类型自然保护区,目前整体生态质量较好( $0.71 \leq S \leq 0.85$ , 达 I 级标准),具有极高的保护价值,属于优先保护区域。

表 4 生态质量综合评价

Table 4 Comprehensive evaluation of ecological quality

指标 Index	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	得分(S) Score
$C_1$	0.0959	0.0131	0.0314	0.0151	0.1556
$C_2$	0.1829	0.0246	0.0109	0.0187	0.2372
$C_3$	0.0596	0.0246	0.0255	0.0137	0.1233
$C_4$	0.0408	0.0663	0.0055	0.0133	0.1260
$C_5$	0.1399	0.0437	0.0074	0.0351	0.2261
$C_6$	0.0255	0.0228	0.0058	0.0017	0.0558
$C_7$	0.0089	0.0051	0.0041	0.0021	0.0202
合计 Total	0.5535	0.2002	0.0906	0.0998	0.9442

#### 4 讨论

根据该保护区的生态特征和保护现状,依据《自然保护区自然生态质量评价技术规程》(LY/T 1813—2009)进行汇总打分,结果表明,高黎贡山保护区保山片区生物多样性丰富,典型性很强,物种稀有性较强,自然性较高,面积适宜,保护区内及周边地区人为干扰强度不大。生态质量评价总分为 0.9442,评价结果为 I 级,自然生态质量很好,在我国西北地区乃至全国具有典型的代表意义。这说明经过建区 30 余年的发展,保护区生态质量保护已具成效,具有极高的生态科研价值和社会效益,建议将高黎贡山纳入以国家公园为主体的自然保护地体系。

从生态评价结构模型指标层得分来看,评分较低的 2 项分别为脆弱性(0.66)和人为干扰(0.76)。这是由于保护区所处区域并列着三山两川,东西间地形窄束,相对封闭,且复杂多变的地形可能在局部形成一些相对稳定的环境,为将要灭绝的物种创造避难环境,或有利于一些向南撤退的生物物种保留,从而使保护区保存了许多孑遗植物和古老种类,如秃杉、光叶珙桐、华南紫树、云南榧树、云南八角莲等,仅仅在某些水热条件优越、地形避寒的山谷中残存下来。时间和空间上的环境异质性增加了生物多样性,植物种类交汇渗透,新老兼蓄现象在保护区表现得特别突出,区系组成极其丰富<sup>[20,35]</sup>。但异质环境可能会使这些物种抵御外界干扰和环境变化的能力减弱,因为对许多生物类群而言,复杂的异质环境已经不是栖息繁衍的最佳环境。而保护区周边地区仍然存在一定的人为影响,一旦保护区遭受干扰和破坏,这些物种的敏感性很强,他们退缩或消失的速度较其他物种快<sup>[34]</sup>。因此,保护区需进一步充实保护管理力量,加强保护管理力度,特别是针对珍稀濒危特有的动植物类型需要制定

相应的保护计划。

采用层次分析法对自然保护区进行生态质量评价过程体现了“分解—判断—综合”的思维特征<sup>[1,4,22,29]</sup>。与定性描述相比,层次分析法可以量化各指标的相对重要性,加之专家意见可有效增强评价结果的准确性与说服力。定性定量分析的结合是一种有效的系统分析方法,对进一步完善森林生态系统类型自然保护区生态质量评价的理论和方法具有借鉴意义。但目前自然保护区生态质量评价的指标较多,且评价标准有待更新。在今后有必要依据自然保护区的区域特征及保护对象等特征,选择具体的评价指标体系,细化评价指标的分级依据和分级赋值标准,选择更具针对性的评价方法。

#### 参考文献

- [1] 叶文虎, 梁胜基. 环境质量评价学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1994.
- [2] 叶亚平, 刘鲁君. 中国省域生态环境质量评价指标体系研究[J]. 环境科学研究, 2000, 13(3): 33-36.
- [3] 宋立奕, 艾畅, 谭成江, 等. 茂兰国家级自然保护区生态质量评价[J]. 林业经济, 2016, 38(12): 91-94.
- [4] 饶丽, 周利军, 徐聪, 等. 生态环境质量评价的内涵、方法和实践[J]. 亚热带水土保持, 2020, 32(3): 37-41, 54.
- [5] 赵景柱, 肖寒, 吴刚. 生态系统服务的物质与价值量评价方法的比较分析[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 290-292.
- [6] 李瑾, 安树青, 程小莉, 等. 生态系统健康评价的研究进展[J]. 植物生态学报, 2001, 25(6): 641-647.
- [7] SHI Z, LI H Y. Application of artificial neural network approach and remotely sensed imagery for regional eco-environmental quality evaluation[J]. Environmental monitoring and assessment, 2007, 128(1/2/3): 217-229.
- [8] 金祖达, 韦福民, 周天焕. 基于 AHP 法的大盘山国家级自然保护区生态质量评价研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(7): 185-190.
- [9] MA H, SHI L Y. Assessment of eco-environmental quality of Western Taiwan Straits Economic Zone[J]. Environmental monitoring and assessment, 2016, 188(5): 1-11.
- [10] SHI X Q, ZHAO J Z, OUYANG Z Y. Assessment of eco-security in the Knowledge Grid e-science environment[J]. Journal of systems & software, 2006, 79(2): 246-252.
- [11] 杨国斌. 兰坪云岭省级自然保护区生态质量评价研究[J]. 西部林业科学, 2011, 40(4): 48-53.
- [12] 马建章, 戎可, 程鲲. 中国生物多样性就地保护的研究与实践[J]. 生物多样性, 2012, 20(5): 551-558.
- [13] 中国环境监测总站. 中国生态环境质量评价研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [14] 徐海根, 包浩生. 自然保护区生态安全设计的方法研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1266-1270.
- [15] 孟伟. 区域景观生态质量评价研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [16] 米锋, 谭曾豪迪, 顾艳红, 等. 我国森林生态安全评价及其差异化分析[J]. 林业科学, 2015, 51(7): 107-115.
- [17] 国家环境保护总局自然生态保护司, 国家环境保护总局南京环境科学研究所. 中国国家级自然保护区[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [18] 朱振华, 毋其爱, 杨礼攀. 高黎贡山自然保护区野生动植物资源现状及保护[J]. 林业科技, 2003, 28(6): 63-65.
- [19] 杨飞龄, 胡金明, 武瑞东. 基于 NPWP 的云南植物保护优先区分析[J]. 地理学报, 2013, 68(11): 1538-1548.
- [20] 西南林学院. 高黎贡山国家自然保护区[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995.
- [21] 李恒, 郭辉军, 刀志灵. 高黎贡山植物[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [22] 赵焕臣. 层次分析法: 一种简易的新决策方法[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [23] 朱晓华, 杨秀春. 层次分析法在区域生态环境质量评价中的应用研究[J]. 国土资源科技管理, 2001, 18(5): 43-46.
- [24] 李恺. 层次分析法在生态环境综合评价中的应用[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(2): 183-185.

的试验结果差异较大,可能由于黄水本身成分复杂,且其中酸性物质多,影响了供试菌株的产酯能力,从侧面反映出白酒酿造的复杂性。

黄水中乳酸乙酯含量极高,与黄水对照相比,有3株酵母(H1Y-24、Z9Y-91、S432Y-32)能降低黄水中的乳酸乙酯,但都不显著。7株酵母中都能提高丁酸乙酯含量,且有1株(H1Y-24)达差异极显著,说明此菌促进丁酸乙酯合成具有一定的应用前景。

在浓香型白酒中,酯是主要的香味物质,其中四大酯占

总酯98%以上,它们含量及比例对白酒风味起着决定性作用<sup>[9]</sup>。通常,五粮液四大酯量比关系为己酸乙酯:乙酸乙酯:乳酸乙酯:丁酸乙酯=1:0.4~0.5:0.4~0.5:0.13<sup>[10]</sup>。从黄水中四大酯的比例关系看出,黄水对照中乳酸乙酯非常高,为己酸乙酯49.6倍。通过酵母麸曲的处理,H1Y-24、S432Y-42酵母能显著提高己酸乙酯含量,降低了乳酸乙酯含量,说明这些菌株通过增加己酸乙酯含量可改善黄水的四大酯比例,使其量比向协调方向发展,具有较好的应用效果。

表3 7株酵母对黄水中四大酯的影响

Table 3 Synthesis ability comparison of 7 yeasts to 4 esters in yellow serofluid

mg/L

试验组 Experimental group	己酸乙酯 Ethyl hexanoate	乙酸乙酯 Ethyl acetate	乳酸乙酯 Ethyl lactate	丁酸乙酯 Ethyl butyrate
H1Y-24	5.38±5.21**	1.26±2.79	34.39±13.20	1.35±0.28**
S432Y-42	3.08±2.14**	0.98±0.87	37.04±11.25	0.47±0.54
Z8Y-15	1.61±0.98	1.24±0.05	38.30±15.95	0.30±0.68
Z8Y-91	1.96±2.11	1.17±0.87	39.25±10.44	0.25±0.15
Z9Y-91	0.94±0.99	0.84±0.24	34.71±11.99	0.14±0.57
S432Y-32	0.81±0.15	0.90±1.64	36.87±10.38	0.18±0.39
S422Y-9	0.73±0.32	0.63±0.45	38.76±7.98	0.16±0.71
麸皮对照 Bran control	1.28±0.34	0.82±0.75	37.12±11.87	0.14±0.10
黄水对照 Yellow water control	0.76±0.37	0.97±0.47	37.72±13.26	0.13±0.16

注:\*表示与黄水对照差异显著( $P<0.05$ ),\*\*表示与黄水对照差异极显著( $P<0.01$ )

Note: \* indicates significant difference with yellow water control ( $P<0.05$ ), and \*\* indicates extremely significant difference with yellow water control ( $P<0.01$ )

### 3 结论

该研究先通过改良酸醇酯化体系,评价了17株酵母的四大酯合成能力,再将筛选得到的7株酵母应用于黄水酯化,得到如下结论:

(1)通过在2种酯化体系中比较发现,供试菌株合成四大酯的能力趋势基本一致,表明采用改良的酸醇酯化体系对酵母麸曲进行酯化力测定具有可行性,且可同时考察四大酯合成能力,较以往以己酸乙酯含量为指标更全面、科学。

(2)7株酵母在改良酸醇酯化体系中能显著提高己酸乙酯含量,但在黄水中仅有2株(H1Y-24、S432Y-42)能显著提高,这是由于黄水自身物质复杂,导致结果重现性差,也可能是酵母在麸皮上培养烘干,导致活菌体少,今后将对酵母的应用方式等参数作进一步研究。

(3)H1Y-24能显著提高黄水己酸乙酯含量,也能提高乙酸乙酯和丁酸乙酯含量,同时能降低黄水中乳酸乙酯含

量,使黄水四大酯量比关系向协调方向发展,表明该酵母具有一定的应用前景。

### 参考文献

- [1] 李可,范志刚,王俊芳,等.浓香型白酒发酵黄水中微生物群落结构解析[J].食品与生物技术学报,2015,34(11):1155-1161.
- [2] 李娟.黄浆水的综合开发利用[D].济南:山东轻工业学院,2012.
- [3] 陈帅,赵金松,郑佳,等.红曲与产酯酵母酯化黄水代谢物的特征[J].食品科学,2013,34(7):1-5.
- [4] 陈雪玲,王涛,游玲,等.复合菌剂制备强化大曲的应用研究[J].酿酒科技,2015(9):58-61,64.
- [5] 蒲春,胡沂淮,贾亚伟,等.产酯酵母的筛选及其发酵特性研究[J].酿酒科技,2013(3):47-49,53.
- [6] 赖登泽.浓香型白酒生产中“增己降乳”科学、合理性的研究[J].酿酒,2007,34(5):4-7.
- [7] 李志斌,李净.浓香型白酒中的重要物质——辛酸乙酯含量及其贡献分析[J].酿酒,2013,40(3):33-36.
- [8] 姜涛,任国军,杨玉珍,等.高酸高酯发酵液的制备[J].酿酒,2015,42(4):37-44.
- [9] 泸州老窖集团有限责任公司.泸型酒技艺大全[M].北京:中国轻工业出版社,2011:383.
- [10] 郗晔.红曲霉处理黄水的研究[J].酿酒,2015,42(5):25-27.
- [11] 徐林楠,张凯,胡红雪,等.基于Yaahp软件的铜陵市生态环境质量评价研究[J].可持续发展,2020,10(2):133-139.
- [12] 孔洋阳,韩海荣,康峰峰,等.莫莫格国家级自然保护区生态评价[J].浙江农林大学学报,2013,30(1):55-62.
- [13] 吴征镒.中国植被[M].北京:科学出版社,1980.
- [14] 熊清华,艾金森.高黎贡山研究文丛:第1卷:高黎贡山自然与生物多样性研究[M].北京:科学出版社,2006.
- [15] 王文杰,潘英姿,李雪.区域生态质量评价指标选择基础框架及其实现[J].中国环境监测,2001,17(5):17-21.
- [16] 柴勇,孟广涛,武力.高黎贡山自然保护区国家重点保护植物的组成特征及其资源保护[J].西部林业科学,2007,36(4):57-63.
- [17] 国家林业局.自然保护区自然生态质量评价技术规程:LY/T 1813—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [18] 张琰,张森.基于AHP法的董寨国家级自然保护区生态评价[J].广东农业科学,2012,39(6):145-148.
- [19] 徐丽.森林类自然保护区生态质量评价研究:以鼎湖山自然保护区为例[D].武汉:华中农业大学,2014.
- [20] 李崧,邱微,赵庆良,等.层次分析法应用于黑龙江省生态环境质量评价研究[J].环境科学,2006,27(5):1031-1034.
- [21] 鲁小波,马斌斌,陈晓颖,等.基于集对分析与AHP的自然保护区生态旅游健康度评价[J].西部林业科学,2015,44(1):129-134.

(上接第148页)