

# 中国森林遥感 Rao's Q 指数逐年数据集 (2000–2017)

蒋 啸<sup>1,2</sup>, 蔡红艳<sup>1</sup>, 杨小唤<sup>1,2\*</sup>

1. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100101

**摘 要:** 遥感 Rao's Q 指数能够表征宏观森林植物功能多样性, 是生态质量评估的重要指标, 对于有效开展区域生物多样性保护工作具有重要意义。基于传统的 Rao's Q 指数定义, 利用 NDVI 植被光谱差异, 以像元值表示森林植物性状, 以邻域像元值之差构建距离矩阵, 在 R 语言平台上计算得到 2000–2017 年的森林遥感 Rao's Q 指数。数据时间分辨率为年, 空间分辨率为 5 km, 投影方式为阿尔伯斯等面积投影, 坐标系为 WGS-84。数据集存储为.tif 格式, 由 72 个数据文件组成, 数据量为 58.2 MB。

**关键词:** 遥感; Rao's Q 指数; 2000–2017

**DOI:** <https://doi.org/10.3974/geodp.2024.01.02>

**CSTR:** <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2024.01.02>

## 数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2024.03.08.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.03.08.V1>.

## 1 前言

生物多样性是生态系统服务的核心和基石。当前全球生物多样性变化剧烈<sup>[1]</sup>, 亟需从时间和空间上明确其变化, 以制定和有效实施生物多样性保育管理决策。近日, 我国生态环境部首次将生物多样性指标纳入生态质量综合评价指标框架, 以引导各级政府加强生物多样性保护, 遏制生物多样性丧失和生态系统退化趋势。在此背景下, 遥感具有获取多尺度、大范围、高精度的时空异质性信息的优势, 已成为生物多样性研究的重要手段<sup>[2]</sup>。

光谱变异假说成为遥感生物多样性研究的重要理论<sup>[3–5]</sup>。基于此, Rocchini 等于 2017 年首次提出遥感 Rao's Q 指数, 以遥感像元值表征功能性状, 并考虑了生态过程的影响范围, 有效识别单一生态系统内部的功能性状差异<sup>[6, 7]</sup>, 尤其在时空变化监测方面优势突出, 很大程度弥补了传统生物多样性研究在短时间完成大区域尺度量化的不足。该指数已被广

收稿日期: 2024-01-05; 修订日期: 2024-03-15; 出版日期: 2024-03-25

基金项目: 中华人民共和国科学技术部 (2023FY101000, 2017YFC0503803)

\*通讯作者: 杨小唤 AAC-8887-2021, 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, yangxh@igsnrr.ac.cn

数据引用方式: [1] 蒋啸, 蔡红艳, 杨小唤. 中国森林遥感 Rao's Q 指数逐年数据集 (2000–2017) [J]. 全球变化数据学报, 2024, 8(1): 14–20. <https://doi.org/10.3974/geodp.2024.01.02>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2024.01.02>.

[2] 蒋啸, 蔡红艳, 杨小唤. 中国森林遥感 Rao's Q 指数逐年数据集 (2000–2017) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.03.08.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.03.08.V1>.



泛应用于不同气候带<sup>[8,9]</sup>的森林植物多样性研究，能够较好地表征我国海南红树林的时空异质性<sup>[10]</sup>。然而，目前中国尚缺少大区域尺度跨气候带的森林植物多样性数据集，相应的宏观尺度的森林植物多样性研究仍较匮乏。在此背景下，研究引入遥感 Rao’s Q 指数，充分认识我国森林植物多样性的空间分布以及随时间变化的信息<sup>[11]</sup>，以为生物多样性保护统筹规划及生态质量评估等提供参考。

2 数据集元数据简介

《中国森林遥感 Rao’s Q 指数逐年数据集（2000–2017）》<sup>[12]</sup>的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 《中国森林遥感 Rao’s Q 指数逐年数据集（2000–2017）》元数据简表

| 条 目       | 描 述   |
|-----------|---|
| 数据集名称     | 中国森林遥感 Rao’s Q 指数逐年数据集（2000–2017）   |
| 数据集短名     | ChinaForest_Rao   |
| 作者信息      | 蒋啸 AAE-1541-2021，中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室；中国科学院大学，jiangx.20b@igsnrr.ac.cn<br>蔡红艳 Y-8555-2019，中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室，caihy@igsnrr.ac.cn<br>杨小唤 AAC-8887-2021，中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室；中国科学院大学，yangxh@igsnrr.ac.cn                       |
| 地理区域      | 中国  |
| 数据年代      | 2000–2017 年   |
| 时间分辨率     | 逐年  |
| 空间分辨率     | 5 km  |
| 数据格式      | .tif  |
| 数据量       | 压缩后 5.17 MB   |
| 数据集组成     | 数据集包含 1 个文件夹：<br>“ChinaForest_Rao”包含 2000-2017 年逐年的中国森林 Rao’s Q 指数数据，数据格式为.tif。数据集共包含 72 个数据文件，文件名包含时相信息，如“ChinaForest_Rao_2000.tif”为 2000 年的中国森林 Rao’s Q 指数，空间分辨率为 5 km，值越高代表森林多样性越丰富  |
| 基金项目      | 中华人民共和国科学技术部（2023FY101000，2017YFC0503803）   |
| 数据计算环境    | RStudio、ArcGIS，中国科学院地理科学与资源研究所内平台   |
| 出版与共享服务平台 | 全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>  |
| 地址        | 北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所  |
| 数据共享政策    | （1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10%引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[13]</sup> |
| 数据和论文检索系统 | DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS   |



3 数据研发方法

3.1 算法原理

Rao’s Q 指数也称作 Rao 二次熵指数，是生态学中功能多样性指数的一种，常用于描述功能性状的差异<sup>[14]</sup>。2017 年，Rocchini 将遥感数据与传统 Rao’s Q 指数结合，首次提出遥感 Rao’s Q 指数算法<sup>[6]</sup>。具体而言，以像元值表示功能性状，以某个像元值的占比表示性状的相对丰度，当窗口内相对丰度越接近时，则均匀度越高；以邻域像元值之差构建距离矩阵，当像元值之差越高则距离越远；Rao’s Q 指数值越高，则功能性状差异越大，即多样性越丰富，计算公式如下<sup>[14]</sup>：

$$d_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (X_{ik} - X_{jk})^2 \tag{1}$$

$$Q = \sum_{i=1}^{S-1} \sum_{j=i+1}^S d_{ij} p_i p_j \tag{2}$$

式中，Q 为 Rao’s Q 指数， $d_{ij}$  为性状 i 和性状 j 的差异度，以邻域像元 i、j 的像元值之差表示， $X_{ik}$ 、 $X_{jk}$  代表 i、j 的性状特征，n 为滑动窗口内的总像元数，S 为滑动窗口内像元值的种数， $p_i$ 、 $p_j$  为性状 i、j 的相对丰度，以滑动窗口内 i、j 像元值的占比表示。本文中 Rao’s Q 指数在 RStudio 平台中进行计算。

3.2 技术路线

技术路线如图 1 所示。数据集制作过程如下：（1）NDVI 数据预处理。逐年的 NDVI 数据下载于中国科学院资源环境科学与数据中心<sup>1</sup>，为便于 Rao’s Q 算法计算，将 NDVI 的值域由 0–1 扩大为 0–10,000，空间分辨率重采样为 5 km × 5 km。（2）森林 NDVI 范围确定。由中国科学院空天信息创新研究院获取的土地覆盖数据提取森林覆盖范围，裁剪 NDVI 以获取森林的 NDVI。（3）Rao’s Q 指数计算。在 Rstudio 平台上，通过 Rao’s Q 指数算法计算获取森林 Rao’s Q 指数。（4）数据验证。从空间上和数值上对比 Rao’s Q 指数与裸子植物物种丰富度的一致性；（5）森林 Rao’s Q 指数数据集生成。

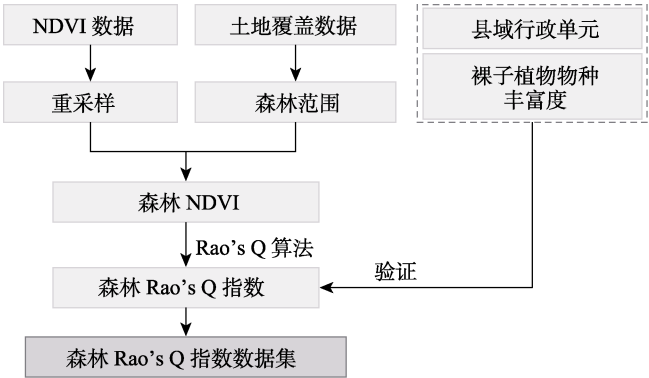


图 1 数据集研发流程图

<sup>1</sup> <http://www.resdc.cn/>.



4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

《中国森林遥感 Rao's Q 指数逐年数据集（2000–2017）》的组成文件的命名方式、数据描述、数据格式、文件个数及数据量如表 1 所示。

4.2 中国森林 Rao's Q 指数空间分布

如图 2 所示为部分年份我国森林 Rao's Q 指数空间分布。总体而言，森林 Rao's Q 指数变化范围为 0.25–2,296，高值区分布于天山山脉、吕梁山、喜马拉雅山脉以南、横断山脉一带、武夷山-南岭一带，低值区连片分布于小兴安岭、大兴安岭、长白山一带，高值区的森林功能性状差异较大，森林植物多样性丰富，相应的东北部的森林植物多样性较为单一。

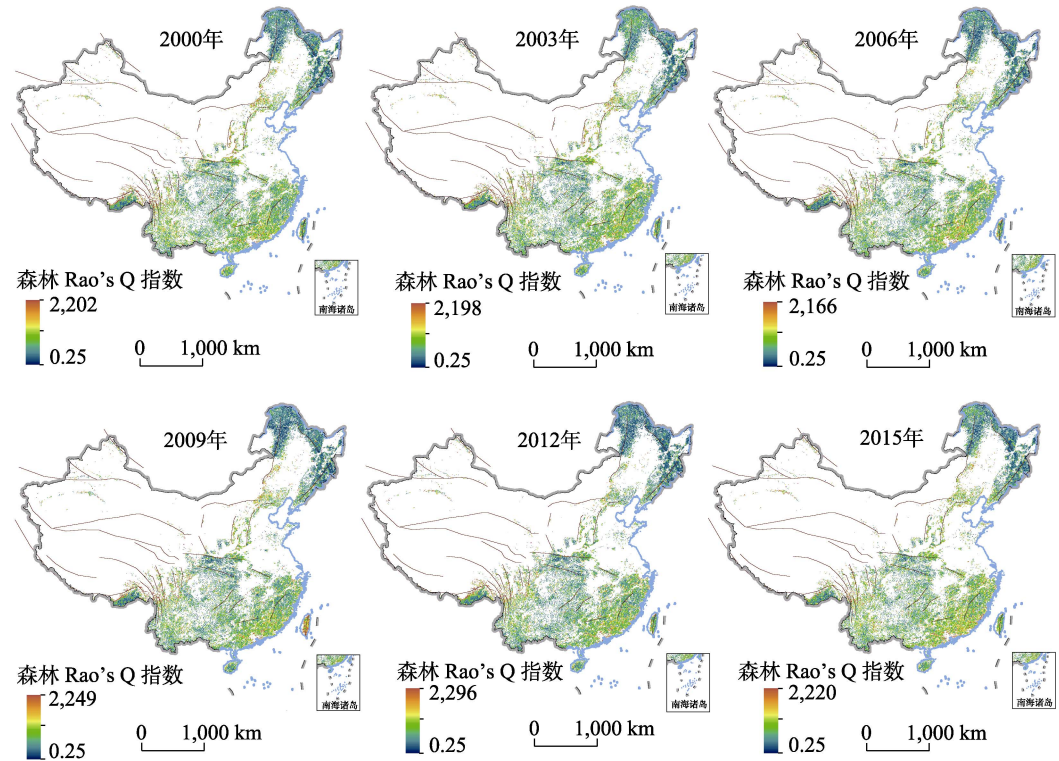


图 2 我国森林 Rao's Q 指数空间分布示例图

（注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站审图号为 GS(2020)3184 的标准地图制作，底图无修改）

4.3 数据结果验证

目前，兼顾时间和空间变化的大尺度生物多样性实地调研面临巨大的挑战。全国范围的生物多样性数据极为有限，仅获取到 2009 年以县域为统计单元的裸子植物物种丰富度空间分布数据<sup>[15]</sup>。松科、柏科和杉科既是常绿针叶林的主要建群种，又是裸子植物的典型代表，常绿针叶林与裸子植物具有高度一致的光谱特征。由此，将常绿针叶林 Rao's Q 指数与裸子植物物种丰富度进行对比，从空间分布和数理统计两个方面展开。空间上，为与物



种丰富度统计单元保持一致，首先以县域单元统计 Rao's Q 指数并进行空间化，再将两者进行对比如图 3 所示。数理统计上，随机生成覆盖全国森林的样本点，分别提取对应的 Rao's Q 指数及物种丰富度，最终得到约 5,400 个有效样本。物种丰富度范围为 0–35 为离散型数据，Rao's Q 指数范围为 0.25–2,269 为连续型数据，每个物种丰富度数值对应的 Rao's Q 指数数值具有一定的范围。将部分物种丰富度与 Rao's Q 指数的最大值、最小值、均值进行对比如表 2 所示，由于中位数、众数、均值较为接近，在此仅列出均值。遥感 Rao's Q 算法输入数据为整型的限制，研究以 1–10,000 的 NDVI 为输入数据，以像元值之差表示的性状特征差异巨大，加之 3×3 的滑动窗口内也存在低均匀度到高均匀度的差异，由此，遥感 Rao's Q 指数值域较广，以此来表征的功能性状差异更突出。另外，物种丰富度为县域统计单元，而 Rao's Q 指数空间分辨率为 5 km，由此，同一县域单元内对应 n 个像元，存在 Rao's Q 指数最小值、最大值差异较大的情况。

空间上，常绿针叶林 Rao's Q 指数与物种丰富度空间分布基本一致。两者的高值区集中分布于喜马拉雅山脉东南部-横断山脉一带，其次为武夷山-南岭一带，而低值区则主要分布在我国东北部。数理统计上，随着物种丰富度增大，Rao's Q 指数最大值呈波动变化无明显的规律，而最小值及均值逐渐增大，尤其当物种丰富度大于 15 时，Rao's Q 指数均值增长明显，遂认为均值更具有代表性。以物种丰富度为自变量，Rao's Q 指数均值为因变量进行回归分析建模表明两者高度拟合， $R^2$  约 0.66，通过  $P<0.001$  极显著检验。综上说明，Rao's Q 指数能够表征森林植物多样性。

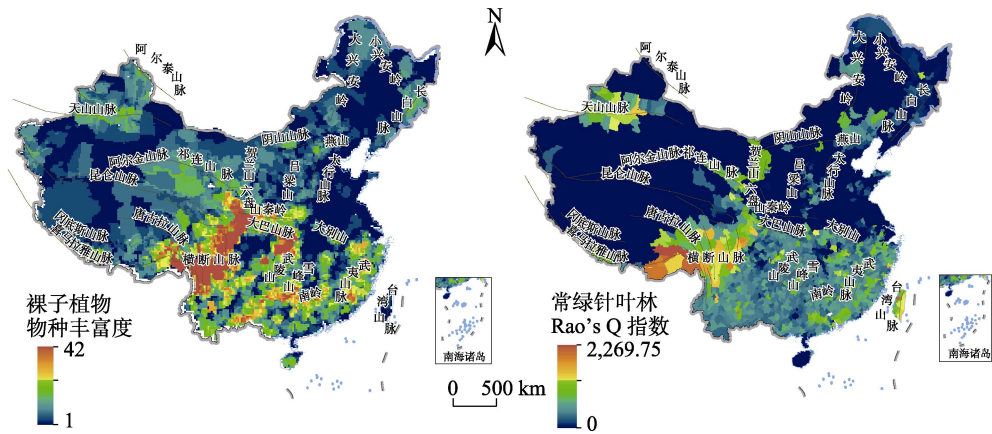


图 3 裸子植物物种丰富度与常绿针叶林 Rao's Q 指数空间对比图

(注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站审图号为 GS GS(2020)3184 的标准地图制作，底图无修改)

5 讨论和总结

本研究引入遥感 Rao's Q 指数，是该指数表征我国森林植物多样性的首次应用。中国森林遥感 Rao's Q 指数数据集时间跨度为 2000–2017 年，空间分辨率为 5 km，时间分辨率为逐年，为区域生态质量评估提供一种新的监测指标，进而为森林植物多样性保护及区域生态质量改善相关政策制定提供支撑。



表 2 裸子植物物种丰富度与常绿针叶林 Rao’s Q 指数数值对比

| 物种<br>丰富度 | Rao’s Q 指数 |       |        | 物种<br>丰富度 | Rao’s Q 指数 |        |        |
|-----------|------------|-------|--------|-----------|------------|--------|--------|
|           | 最大值        | 最小值   | 均值     |           | 最大值        | 最小值    | 均值     |
| 1         | 1,797.13   | 0.25  | 290.91 | 19        | 1,948.00   | 56.40  | 525.82 |
| 3         | 1,901.88   | 17.00 | 326.31 | 21        | 1,390.89   | 17.25  | 484.65 |
| 5         | 1,405.78   | 6.75  | 286.56 | 23        | 1,259.11   | 18.22  | 420.01 |
| 7         | 1,640.00   | 35.11 | 296.00 | 25        | 1,211.12   | 95.00  | 460.75 |
| 9         | 1,948.20   | 21.11 | 318.20 | 27        | 1,135.60   | 114.25 | 510.12 |
| 11        | 2,095.50   | 78.75 | 315.14 | 29        | 1,481.56   | 25.56  | 482.08 |
| 13        | 1,477.25   | 59.00 | 281.84 | 31        | 1,481.56   | 166.14 | 456.28 |
| 15        | 1,225.11   | 23.25 | 295.73 | ≥32       | 894.06     | 83.55  | 397.43 |
| 17        | 1,923.56   | 26.50 | 399.24 |           |            |        |        |

遥感技术极大地促进了生物多样性宏观尺度的研究。遥感 Rao’s Q 指数算法基于生态学中的 Rao’s Q 指数定义，以滑动窗口、邻域像元构建距离矩阵来表征生态过程的空间范围<sup>[16]</sup>。本数据集仅涉及中国森林并以 NDVI 为数据源，而以其他遥感植被指数模拟的 Rao’s Q 指数已应用于热带、温带、亚热带等地区，且并不局限于森林生态系统<sup>[8, 9]</sup>。研究前期分别以叶面积指数 LAI、增强型植被指数 EVI 以及比值植被指数 RVI 为数据源模拟得到中国森林的 LAI-Rao’s Q 指数，EVI-Rao’s Q 指数以及 RVI-Rao’s Q 指数，经对比，NDVI-Rao’s Q 指数与物种丰富度的一致性较高，其次为 LAI-Rao’s Q 指数，而 EVI-Rao’s Q 指数和 RVI-Rao’s Q 指数与物种丰富度的关系不明显。值得注意的是，森林遥感 Rao’s Q 指数不等于物种丰富度，在此仅表征宏观尺度的森林植物多样性。目前，遥感 Rao’s Q 指数仍处于探索阶段，还需更翔实的生物多样性数据加以验证，进一步挖掘其表征的生态学信息并加以应用。

作者分工：蒋啸负责论文的撰写、Rao’s Q 指数数据处理与整理；蔡红艳负责数据集生产的总体设计与论文撰写工作；杨小唤负责数据处理方法审核、数据质量把控及文稿完善。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

[1] Pimm, S. L., Russell, G. J., Gittleman, J. L., *et al.* The future of biodiversity [J]. *Science*, 1995, 269(5222): 347–350.

[2] 郭庆华, 胡天宇, 姜媛茜等. 遥感在生物多样性研究中的应用进展[J]. *生物多样性*, 2018, 26(8): 789–806.

[3] Féret, J. B., Asner, G. P. Mapping tropical forest canopy diversity using high-fidelity imaging spectroscopy [J]. *Ecological Applications*, 2014, 24(6): 1289–1296.

[4] Wang, R., Gamon, J. A. Remote sensing of terrestrial plant biodiversity [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111218.

[5] Palmer, M. W., Earls, P. G., Hoagland, B. W., *et al.* Quantitative tools for perfecting species lists [J]. *Envi-*



- ronmetrics*, 2002, 13(2): 121–137.
- [6] Rocchini, D., Marcantonio, M., Ricotta, C. Measuring Rao's Q diversity index from remote sensing: an open source solution [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 72: 234–238.
- [7] Rocchini, D., Marcantonio, M., Re, D. D., *et al.* Time-lapsing biodiversity: an open source method for measuring diversity changes by remote sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111192.
- [8] Khare, S., Latifi, H., Rossi, S. A 15-year spatio-temporal analysis of plant  $\beta$ -diversity using Landsat time series derived Rao's Q index [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107105.
- [9] Khare, S., Latifi, H., Rossi, S. Forest beta-diversity analysis by remote sensing: how scale and sensors affect the Rao's Q index [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 106: 105520.
- [10] Wang, D. Z., Qiu, P. H., Wan, B., *et al.* Mapping  $\alpha$ - and  $\beta$ -diversity of mangrove forests with multispectral and hyperspectral images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 275: 113021.
- [11] 蒋啸, 蔡红艳, 杨小唤等. 中国森林遥感 Rao's Q 指数时空演变[J]. 生态学报, 2023, 43(8): 3045–3056.
- [12] 蒋啸, 蔡红艳, 杨小唤. 中国森林遥感 Rao's Q 指数逐年数据集 (2000–2017) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.03.08.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.03.08.V1>.
- [13] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [14] Petchey, O. L., Gaston, K. J. Functional diversity (FD), species richness and community composition [J]. *Ecology Letters*, 2002, 5(3): 402–411.
- [15] 李果, 沈泽昊, 应俊生等. 中国裸子植物物种丰富度空间格局与多样性中心[J]. 生物多样性, 2009, 17(3): 272–279.
- [16] Hernández-Stefanoni, J. L., Gallardo-Cruz, J. A., Meave, J. A., *et al.* Modeling  $\alpha$ - and  $\beta$ -diversity in a tropical forest from remotely sensed and spatial data [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 19: 359–368.