

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第8期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.08.017

论文标题： 甘肃康南林业总场植物多样性特征及其空间分布格局

作　　者： 李铨国，谢爱萍，胡军民，等

收稿日期： 2025-07-27

引文格式： 李铨国,谢爱萍,胡军民,等.甘肃康南林业总场植物多样性特征及其空间分布格局[J].中南林业科技大学学报,2026,46(8):172-183.

Li Q G, Xie A P, Hu J M, et al. Plant diversity characteristics and spatial distribution patterns in Kangnan forestry general farm, Gansu[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):172-183.

相关论文推荐

Recommended articles

亚高山针叶林不同大小林窗植物多样性及其海拔动态

Plant diversity and elevation dynamics in forest gaps of varying sizes in subalpine coniferous forest

中国冬青属物种多样性空间格局

Geographical distribution pattern of species diversity of the genus *Ilex* in China

金子山国有林场4种典型林分空间结构多样性特征

Spatial structure diversity characteristics of four typical stands in Jinzi mountain national forest farm

抚育间伐对川西柳杉人工林生长和林下植被多样性的影响

Effects of thinning on tree growth and understory vegetation diversity of *Cryptomeria fortunei* plantation

不同混交比例的杉阔混交林对林下物种多样性和土壤养分的影响

Effects of fir and broad-leaved mixed forest with different mixing proportions on the species diversity and soil nutrients under the forest

河南省连翘灌丛群落特征及物种多样性研究

Study on community characteristics and species diversity of *Forsythia suspensa* (Thunb.) Vahl community in Henan

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.08.017 http: //qks.csuft.edu.cn

甘肃康南林业总场植物多样性特征及其空间分布格局

李铨国[1]，谢爱萍[1, 2]，胡军民[3]，罗玉恒[2]

（1. 甘肃农业大学 资源与环境学院，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃林业职业技术大学，甘肃 天水 741020；
3. 甘肃汇智岚图信息科技有限责任公司，甘肃 天水 741020）

摘 要：【目的】探究康南林业总场植物 α 多样性特征及其空间格局，为该林区的差异化生态保护与林业经营管理提供科学依据。【方法】利用全国林草种质资源第二次普查数据，通过统计汇总，计算乔木层、灌木层及草本层的重要值与植物 α 多样性指数，总结其多样性特征，并结合相关分析与空间自相关分析，揭示林区植物多样性的空间格局。【结果】样方重要值显示，乔木层形成以壳斗科 Fagaceae、桦木科 Betulaceae、山茱萸科 Cornaceae 和松科 Pinaceae 为优势科的树种群落，灌木层中竹亚科 Bambusoideae 单优群落占比达 15.6%，草本层中薹草 *Carex* 优势种群落占比为 6.4%。在林区植物 α 多样性指数中，Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数总体上表现为乔木层＜草本层＜灌木层，存在高稳定和低退化植物群落。林区乔木层植物 α 多样性指数与年平均降水量呈极显著正相关，与坡向呈显著正相关；灌木层植物 α 多样性指数与海拔呈显著负相关；草本层植物 α 多样性指数与坡度呈极显著负相关，与海拔呈显著负相关。样方植物 α 多样性指数的空间自相关集聚分布置信度达 99% 以上，且呈显著空间正相关，空间自相关性强度表现为乔木层＞草本层＞灌木层。除灌木层植物的均匀度指数无高 / 低聚类外，其余植物 α 多样性指数均存在不同程度的高 - 高、低 - 低聚类现象，同时也存在低 - 高、高 - 低的聚类异常。【结论】林区植物多样性整体保持稳定，但部分群落存在退化风险；乔木层多样性受降水与坡向影响显著，灌木层多样性受海拔影响明显，草本层多样性则受坡度和海拔双重影响；林区植物多样性空间自相关性突出，既存在高稳定的高 - 高聚类与退化的低 - 低聚类，也存在低 - 高、高 - 低的聚类异常。这些特征为康南林业总场森林经营提供了重要的理论依据与技术参考。

关键词：植物群落；重要值；α 多样性指数；空间自相关分析

中图分类号：S718.5 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)08-0172-12

Plant diversity characteristics and spatial distribution patterns in Kangnan forestry general farm, Gansu

Li Quanguo[1], Xie Aiping[1,2], Hu Junmin[3], Luo Yuheng[2]

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
2. Gansu Forestry Voctech University, Tianshui 741020, Gansu, China;
3. Gansu Huizhi Lantu Information Technology Co., Ltd, Tianshui 741020, Gansu, China)

Abstract:【Objective】By investigating the characteristics and spatial patterns of plant alpha diversity in the Kangnan forestry general farm, this study aims to provide a scientific basis for differentiated ecological conservation and forestry management in this forest area. 【Method】Using data from the second national census of forest and grassland genetic resources, the importance values of the tree layer, shrub layer and herb layer, as well as the plant *α* diversity index were calculated through statistical aggregation. The diversity characteristics were summarized, and combined with relevant analysis and spatial autocorrelation analysis, the spatial pattern of plant diversity in the forest area was revealed.【Result】 Key plot data indicate that the tree layer consists of a community dominated by

收稿日期（Received）：2025-09-15 **修订日期**（Revised）：2025-12-04
基金项目：甘肃省科技厅科技专员项目（24CXGE006）；甘肃省科技厅自然科学基金项目（23JRRE0731）。
第一作者：李铨国（17789334611@163.com），硕士研究生。**通信作者：**谢爱萍（1098107403@qq.com），教授，硕士研究生导师。
引文格式：李铨国 , 谢爱萍 , 胡军民 , 等 . 甘肃康南林业总场植物多样性特征及其空间分布格局 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026, 46(8):172-183.
Li Q G, Xie A P, Hu J M, et al. Plant diversity characteristics and spatial distribution patterns in Kangnan forestry general farm, Gansu[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):172-183.

species from the Fagaceae, Betulaceae, Cornaceae, and Pinaceae families. In the shrub layer, the Bambusoideae subfamily constitutes a single-dominant community accounting for 15.6% of the total, while in the herbaceous layer, communities dominated by the genus *Carex* accounted for 6.4%. Regarding the alpha diversity indices of forest vegetation, the Patrick richness index, Shannon-Wiener diversity index, Simpson diversity index, and Pielou evenness index generally showed a pattern of tree layer < herbaceous layer < shrub layer, indicating the presence of highly stable and less degraded plant communities. The alpha diversity indices of the tree layer in the forest area showed a strong and significant positive correlation with precipitation and a significant positive correlation with aspect; the alpha diversity indices of the shrub layer showed a significant negative correlation with elevation; the alpha diversity indices of the herb layer showed a strong and significant negative correlation with slope and a significant negative correlation with elevation. The spatial autocorrelation of the plant α-diversity indices in the sample plots showed a confidence level of over 99% and exhibited significant positive spatial correlation, with the strength of spatial autocorrelation being highest in the tree layer, followed by the herb layer and then the shrub layer. Except for the evenness index of the shrub layer, which showed no high/low clustering, the plant α-diversity indices of the other layers all exhibited varying degrees of high-high and low-low clustering, as well as low-high and high-low clustering anomalies.【Conclusion】Overall, plant diversity in the forest area remains stable, but some communities are at risk of degradation; tree layer diversity is significantly influenced by precipitation and aspect, shrub layer diversity is markedly influenced by elevation, and herb layer diversity is influenced by both slope and elevation; spatial autocorrelation of plant diversity in the forest area is pronounced, with both highly stable high-high clusters and degraded low-low clusters, as well as anomalous low-high and high-low clusters. These characteristics provide important theoretical foundations and technical references for forest management across the entire region.

Keywords: plant community; importance value; alpha diversity index; spatial autocorrelation analysis

森林植物多样性是森林生态系统中所有植物物种及其遗传变异和生态复合体的总和，是陆地生态系统的重要组成部分[1]，其重要性贯穿生态、经济、社会等维度，不仅是森林生态系统演化的产物，更是维持生态系统稳定性、生产力和恢复力的基础[2-3]。森林植物多样性空间分布格局对探究生态学过程或影响机制至关重要，是生态学研究的重要议题[4-5]。Sterner 等[6]利用 Ripley's K 函数方法分析 4 种热带树种空间分布模式的历史变化，揭示森林群落结构的形成机理；张金屯[7]使用 Ripley's 统计学理论分析美国密歇根州克林顿县优势种栎林植物种群空间分布的点格局。现阶段关于多样性与空间关系的研究，大多聚焦于空间异质性及驱动因子的探究。卫玺玺等[8]以 5 类森林群落为研究对象，解析了贺兰山东西坡典型植物群落物种多样性的空间分异特征及其环境驱动因子；梁红柱等[9]研究发现，太行山东坡中段植物多样性的垂直分布呈现出 2 次峰值。在生物多样性保护与空间优先级划分方面，Tordoni 等[10]针对植物多样性多维度的全球格局及其驱动因素展开了研究。在生物多样性空间格局研究方面，前人多集中于市域以上大尺度的探索，而在县域以内较小区域涉及森林植物多样性空间自相关性的研究却相对较少。本研究选取具有明显气候过渡带特征的康南林业总场植物群落作为对象，以第二次全国林草种质资源普查数据为基础，深入探究该区域森林植物群落的组成及多样性特征，进而揭示其多样性空间分布格局，并构建基于空间分布格局响应的生物多样性分区保护框架，为研究区制定差异化生态保护策略、优化林业经营管理提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

康南林业总场地处甘肃省陇南市康县，地理位置为 105°17′ ～ 105°58′E，32°53′ ～ 33°38′N。康南林业总场的森林斑块分布在县区偏远的深山地带，下设 4 个林场，其中南部为阳坝林场，北部为豆坝林场，中部为长坝林场，东部为清河林场，具体位置如图 1 所示。康南林业总场经营面积 55 520 hm^2，其中国家级重点生态公益林 54 946.67 hm^2，是西北地区高森林覆盖率生态屏障。该区域既是秦巴山地向西延伸的终端，又是黄土高原与青藏高原的地理过渡区，属西秦岭南侧陇南山区，域内山

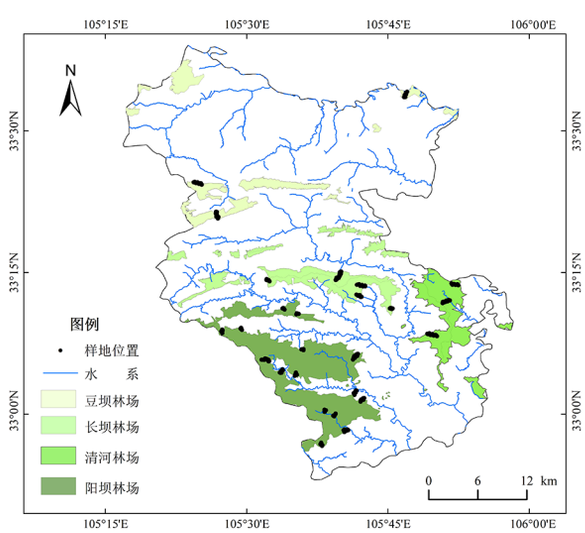


图 1　研究区概况
Fig. 1　Overview of the study area

大沟深，地势险峻。该区域海拔 560 ～ 2 483 m，气候温和，降水充沛，冬无严寒，夏无酷暑，年平均气温 11 ～ 13 ℃，年无霜期 210 ～ 240 d，年降水量 700 ～ 900 mm，南北气候差异较大，属亚热带湿润气候向暖温带半湿润气候的过渡带。特殊的地貌结构与多变的气候系统的协同作用，造就了区域内极为丰富的野生动植物群落，其中有高等植物 172 科 1 400 余种，珍稀植物 28 种，该区域是秦巴 - 岷山生物多样性关键区域。森林蓄积量约 507 万 m^3，固碳释氧能力突出，年蓄水量超 2 亿 m^3，是长江支流嘉陵江的重要水源涵养区。

1.2 数据来源

本研究的林业数据主要来源于第二次全国林草种质资源普查结果及林地更新“林地一张图”数据；地形数据来源于国家地理空间数据云共享的 DEM 数据库（https://www.gscloud.cn），分辨率为 30 m；气象数据来自资源环境科学与数据平台（https://www.resdc.cn/），分辨率为 1 000 m。

1.3 样地设置与调查

在第二次全国林草种质资源普查中，康南林业总场采用样线与样方相结合的布设方法。依据森林分布、地形状况等条件，共布设 26 条样线。沿每条样线每隔 100 ～ 150 m 布设调查样方，共设 218 个样方，样方规格 20 m×20 m。样线与样方的编号遵循自南向北、自东向西的顺序，其中样方编码为 5 位数，前 2 位代表样线编号，后 3 位为样方编号。调查范围覆盖样方内所有维管植物，记录植物的各类属性，并通过林草种质资源外业采集系统完成数字化记录。

1.4 研究方法

1.4.1 重要值计算

植物物种的重要值是衡量某种植物在群落中相对重要性的综合指标，能够全面反映该植物在群落结构、功能及资源竞争中的地位 [11]。本研究结合调查实际情况，依据植物的生活型特点，将森林植物划分为乔木层、灌木层和草本层植物群落。其中，乔木层指高度超过 5 m 且拥有独立主干的树木；灌木层主要为高度低于 5 m 的木质多年生植物，涵盖竹子与藤本；草本层则以草本植物和蕨类植物为主。本研究以样方为基本单元，分别计算乔木层、灌木层和草本层植物的重要值 [12]，根据重要值的大小确定样方优势种的排序，再依据样方优势种重要值的不同区间分析其特征。具体计算公式如下：

$$R_{\mathrm{F}} = \left(\frac{f_i}{f_{\mathrm{total}}}\right) \times 100\% ; \quad (1)$$

$$R_{\mathrm{A}} = \left(\frac{N_i}{N_{\mathrm{total}}}\right) \times 100\% ; \quad (2)$$

$$R_{\mathrm{C}} = \left(\frac{B_i}{B_{\mathrm{total}}}\right) \times 100\% ; \quad (3)$$

$$I_{\mathrm{V}} = (R_{\mathrm{F}} + R_{\mathrm{A}} + R_{\mathrm{C}}) / 3 。 \quad (4)$$

式中：f_i 为频度，物种 i 出现的样方数与区域总样方数的比值；f_{total} 为样方内所有物种频度之和；N_i 为多度，样方内物种 i 的株数；N_{total} 为样方内所有物种的总株数；B_i 为盖度，样方内物种 i 覆盖的面积，乔木层为样方内乔木物种 i 的胸径截面面积之和；B_{total} 为样方内所有物种的盖度之和；I_{V} 为重要值。R_{F}、R_{A}、R_{C} 分别为相对频度、相对多度和相对盖度。

1.4.2 植物 α 多样性指数计算

物种多样性分析参照陈廷贵等 [13] 的方法，分别计算样方内乔木层、灌木层和草本层植物的 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数，得出不同类型植物群落的多样性、丰富度和均匀度，用于评估不同地域森林群落特征。为了综合反映多样性的状态，本研究采用样方内物种的相对重要值计算 Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 多样性指数 [14]。

1.4.3 空间自相关性分析

空间自相关是一种度量空间数据的分布特征和相互关系的统计方法，是检验地理对象属性在邻域空间上的关联和关系的方法 [15]，分为全局和局部空间自相关。在 ArcGIS Pro 软件中，首先采用莫兰指数分析植物 α 多样性指数的全局空间自相关性；随后通过高 / 低聚类分析判断植物物种 α 多样性指数是否存在高 / 低聚类情况；最后利用聚类与异常值分析植物 α 多样性指数的高值、低值空间聚类及空间异常值 [16]。

2 结果与分析

2.1 物种组成

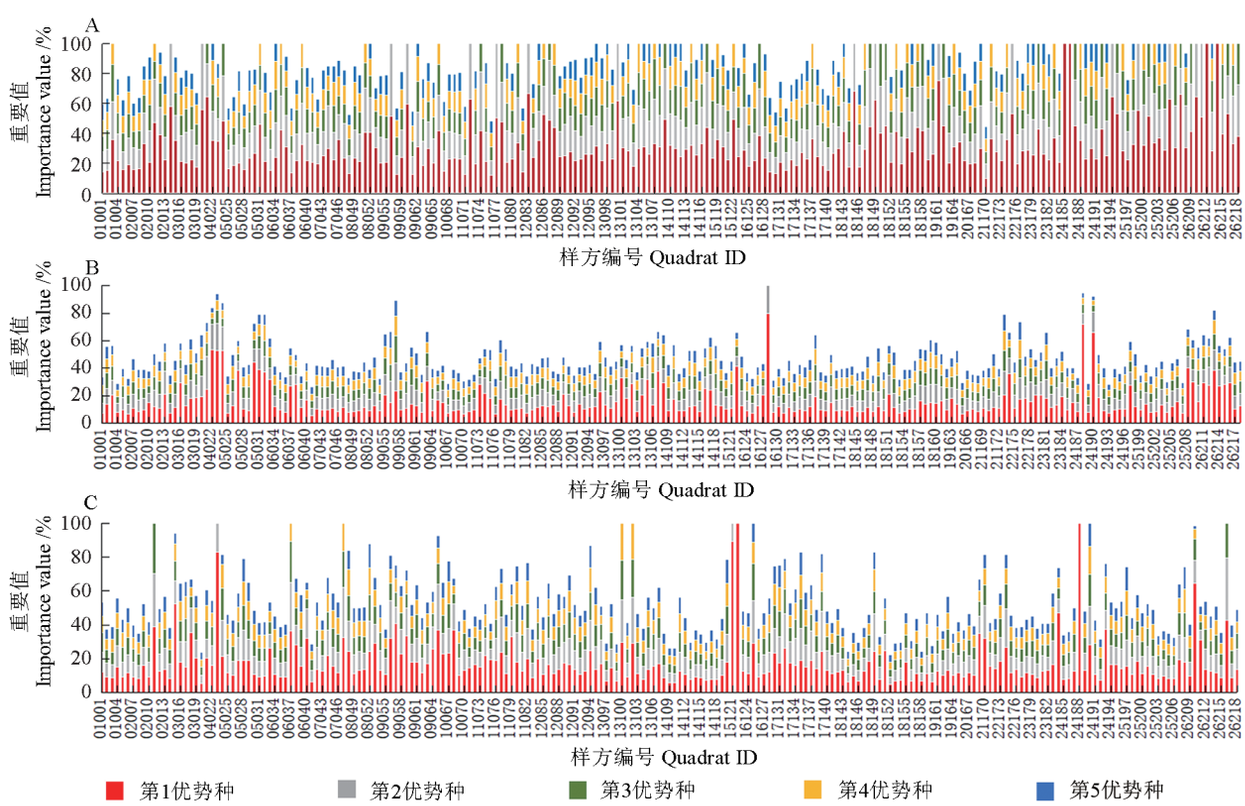
康南林业总场植物种类丰富，通过对 218 个样地的调查，共记录维管植物 133 科 436 属 1 065 种，其中乔木层包含 45 科 86 属 156 种，优势科主要为壳斗科 Fagaceae、桦木科 Betulaceae、山茱萸科 Cornaceae 和松科 Pinaceae 等；灌木层有 66 科

157 属 374 种，优势科为竹亚科 Bambusoideae、忍冬科 Caprifoliaceae、蔷薇科 Rosaceae 等；草本层有 75 科 254 属 535 种，优势科主要为菊科 Asteraceae、鳞毛蕨科 Dryopteridaceae 和百合科 Liliaceae。林区国家重点保护植物资源丰富，依据《国家重点保护野生植物名录（2021 年）》，林区共发现国家重点保护野生植物 25 种，分属 13 科 17 属。其中，国家Ⅰ级保护植物 2 种，为银杏 *Ginkgo biloba* 和毛杓兰 *Cypripedium franchetii*；国家Ⅱ级保护植物 23 种，包括香果树 *Emmenopterys henryi*、连香树 *Cercidiphyllum japonicum*、巴山榧树 *Torreya fargesii* var. *fargesii*、榉树 *Zelkova serrata*、油樟 *Camphora longepaniculata*、峨眉含笑 *Michelia wilsonii Finet*、软枣猕猴桃 *Actinidia arguta*、七叶一枝花 *Paris polyphylla*、球药隔重楼 *Paris fargesii*、狭叶重楼 *Paris polyphylla*、竹节参 *Panax japonicus*、云南红景天 *Rhodiola yunnanensis*、八角莲 *Dysosma versipellis*、羊耳蒜 *Liparis japonica*、杜鹃兰 *Cremastra appendiculata*、扇脉杓兰 *Cypripedium japonicum*、建兰 *Cymbidium ensifolium*、蕙兰 *Cymbidium faberi*、春兰 *Cymbidium goeringii*、剑叶虾脊兰 *Calanthe davidii*、细花虾脊兰 *Calanthe mannii*、流苏虾脊兰 *Calanthe alpina*、三棱虾脊兰 *Calanthe tricarinata*。

2.2　物种的重要值特征

如图 2A 所示，在调查的 218 个样方中，乔木林地样方 217 个。物种重要值为 100% 的样方有 4 个，均为单优树种群落，物种为油松 *Pinus tabuliformis*、华山松 *Pinus armandii*、青檀 *Pteroceltis tatarinowii* 和异叶榕 *Ficus heteromorpha*，主要分布在区域北部。第 1 优势种重要值为 30.0% ～ 75.1% 的样方数为 93 个，物种数为 2 ～ 10，物种种类较多，主要优势科为壳斗科、桦木科、山茱萸科和松科等。这些样方的第 2 优势种重要值为 15.2% ～ 46.8%，第 3 优势种的重要值为 10.8% ～ 30.2%，说明样方内不同物种间重要值差异较大，种间竞争比较突出。第 1 优势种重要值为 10.1% ～ 30.0% 的样方数为 120 个，物种数为 4 ～ 15，物种种类繁多，这些样方的第 2 优势种重要值为 9.9% ～ 28.8%，其他物种间重要值差异较小，表现为多树种共存群落，单优树种不明显。

如图 2B 所示，218 个样方中包含灌木层物种（含竹子与藤本）共计 374 种。第 1 优势种重要值为 19.4% ～ 79.5% 的样方共 49 个，只有 1 个样方的物种数为 2，其余样方的物种数为 7 ～ 27。



A、B、C 分别表示乔木层、灌木层和草本层。A, B and C represent the tree layer, shrub layer and herb layer, respectively.

图 2　不同生活型植物前 5 优势植物的重要值

Fig. 2　Importance values of the top 5 dominant plant species among different plant life forms

其中竹亚科 Bambusoideae（缺苞箭竹 *Fargesia denudata*、青川箭竹 *Fargesia rufa*、巴山木竹 *Arundinaria fargesii*）有 43 个样方，占灌木层总样方的 15.6%，此类样方内其余物种的重要值均低于 21.0%，竹亚科植物优势明显。第 1 优势种重要值为 5.7% ～ 19.2% 的样方数为 169 个，占总样方的 77.5%，物种数为 9 ～ 39，主要有竹亚科、亮叶忍冬 *Lonicera ligustrina*、绞股蓝 *Gynostemma pentaphyllum*、常春藤 *Hedera nepalensis*、棣棠花 *Kerria japonica* 等，优势种不突出。

如图 2C 所示，调查样方中有 217 个样方分布有草本植物，共 535 种（含蕨类）。重要值为 100% 的样方有 2 个，物种为城口薹草 *Carex luctuosa* Franch 和半岛鳞毛蕨 *Dryopteris peninsulae* Kitag，主要分布在区域北部。第 1 优势种重要值为 28.97% ～ 89.50% 的样方共 25 个，种数为 2 ～ 24，其中薹草 *Carex*（穹隆薹草 *Carex gibba* Wahlenb、城口薹草 *Carex luctuosa* Franch、点叶薹草 *Carex hancockiana* Maxim）样方 14 个，占草本层总样方的 6.4%，这些样方的第 2 优势种重要值为 5.63% ～ 28.84%，主要仍为薹草属植物，薹草属优势种特征明显。第 2 优势种重要值为 4.61% ～ 28.09% 的样方数为 190 个，占总样方数的 87.6%，种数为 5 ～ 41，这些样方中其他物种的重要值和第 1 优势种的重要值差异不大，说明多数样方草本层物种丰富，分布均匀。

2.3 植物 α 多样性特征

2.3.1 不同生活型植物 α 多样性特征

如图 3 所示，乔木层 α 多样性整体处于较低水平。样方乔木层的 Patrick 丰富度指数为 1 ～ 15，平均值为 5.95，标准差为 8.11；Shannon-Wiener 多样性指数为 0 ～ 2.60，平均值为 1.59，标准差为 0.27；Simpson 多样性指数为 0 ～ 0.92，平均值为 0.76，标准差为 0.02；Pielou 均匀度指数为 0 ～ 0.99，平均值为 0.94，标准差为 0.02。这表明样方乔木层物种丰富度差异较大，但多样性和均匀度差异较小，分布相对均衡。多数样方乔木层结构稳定，但存在少量树种单一的样方，其编号为 24185、24186、26212、26214，主要分布在总场北部。灌木层 α 多样性整体较高，群落结构稳定。样方灌木层的 Patrick 丰富度指数为 2 ～ 33，平均值为 18.5，标准差为 26.08，标准差较大的原因是编号为16128的样方丰富度仅为2，其余样方丰富度均大于 6；Shannon-Wiener 多样性指数为 0.51 ～ 3.40，平均值为 2.72，标准差为 0.16；Simpson 多样性指数为 0.33 ～ 0.96，平均值达 0.91，标准差为 0.01；Pielou 均匀度指数为 0.53 ～ 0.99，平均值达 0.94，标准差为 0。这表明灌木层绝大多数样方的 α 多样性指数差异较小，群落结构稳定。草本层 α 多

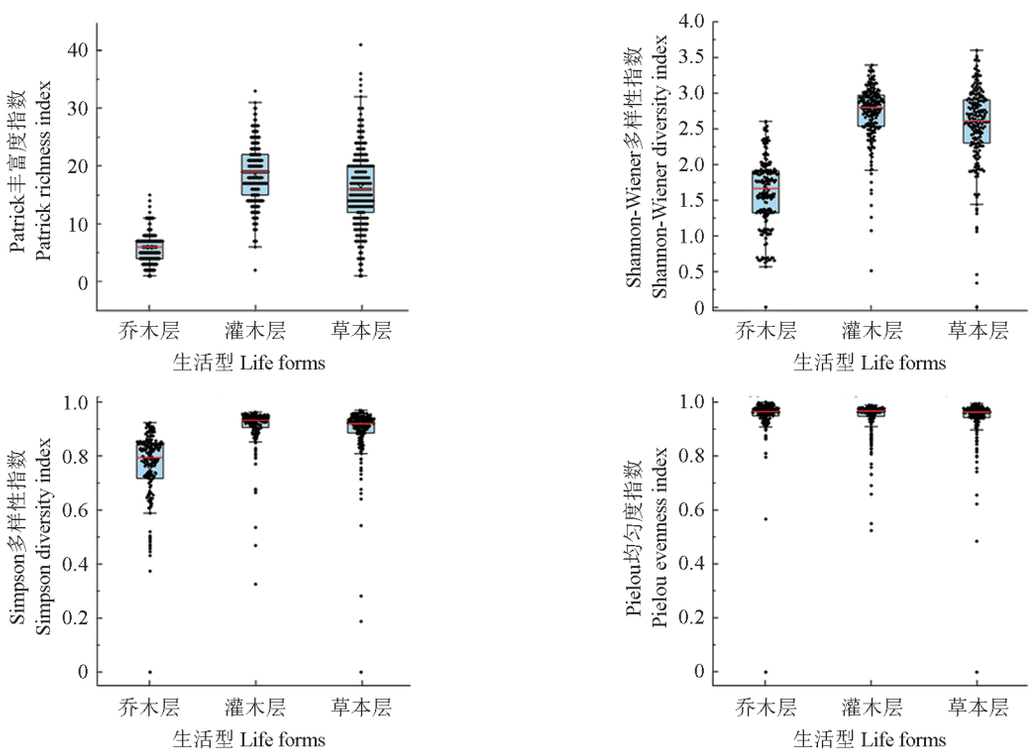


图 3 不同生活型植物 α 多样性指数

Fig. 3 α-diversity index of plants among different life forms

样性整体较好，群落结构相对稳定。样方草本层的 Patrick 丰富度指数为 1 ～ 41，平均值为 16.3，标准差为 50.25，标准差较高的原因是有 15 个样方的丰富度为 1 ～ 5；Shannon-Wiener 多样性指数为 0 ～ 3.60，平均值为 2.53，标准差为 0.33；Simpson 多样性指数为 0 ～ 0.97，平均值为 0.89，标准差为 0.02；Pielou 均匀度指数为 0 ～ 1.00，平均值达 0.94，标准差为 0.01。这表明草本层多数样方的植物多样性较高，结构稳定，但存在少数植物多样性较低的样方。

2.3.2　不同生活型植物 α 多样性叠加分析

基于植物 α 多样性不同指数对各生活型植物的叠加分析发现（图 4），乔木层的 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数及 Simpson 多样性指数总体小于草本层，草本层则小于灌木层。乔木层 Patrick 丰富度指数与 Shannon-Wiener 多样性指数的波动偏差小于灌木层，草本层的波动偏差最大；乔木层和草本层的 Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数除少数样方偏差较大外，其余样方偏差均较小，偏差较大的多为单一优势种显著的样方。结果表明，林区植物多样性整体表现为乔木层＜草本层＜灌木层，除少数样方植物 α 多样性指数偏差较大外，绝大多数群落结构相对稳定。

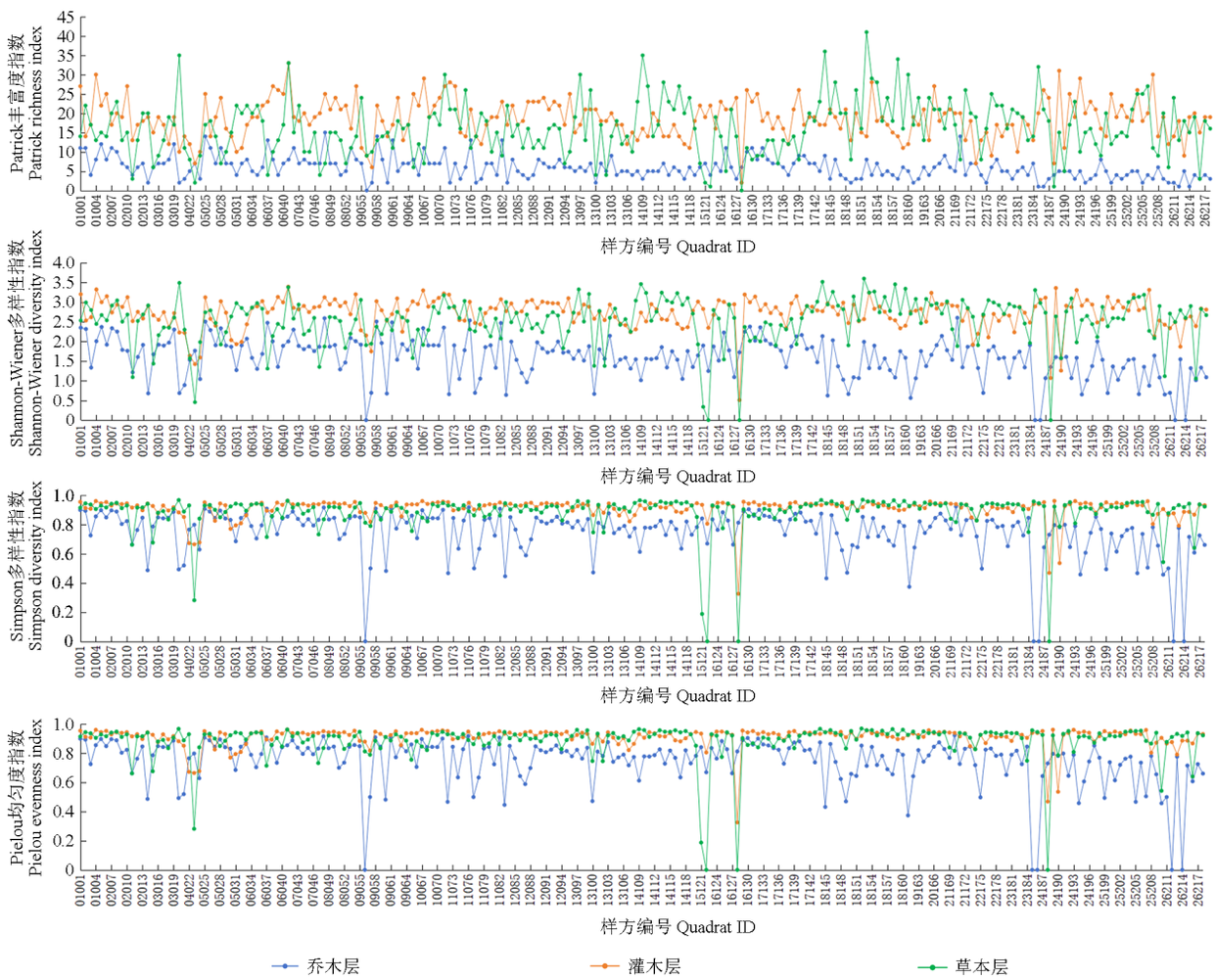


图 4　不同生活型植物 α 多样性叠加分析

Fig. 4　Overlay analysis of *α*-diversity for plants among different life forms

2.4　植物多样性的空间格局分析

2.4.1　植物 α 多样性与区域环境因子的相关性分析

为明确区域环境因子对不同层植物 α 多样性的影响，本研究对乔木层、灌木层和草本层的多样性指数与样方的年平均气温、年平均降水量、海拔、坡度、坡向等因子进行相关性分析，结果见表 1。乔木层的多样性特征主要受降水和坡向调控：Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数均与年平均降水量呈极显著正相关（$P < 0.01$），表明降水增加可显著提升乔木层物种多样性，但对群落均匀度影响不明显；同时，Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数与坡向呈显著正

相关（$P < 0.05$），说明光照条件的改善对乔木层多样性具有正向促进作用；年平均气温、海拔、坡度对乔木层多样性未表现出显著影响。灌木层的多样性则主要受海拔影响：Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数均与海拔呈显著负相关（$P < 0.05$），随海拔升高，灌木层物种多样性呈降低趋势；此外，灌木层 Patrick 丰富度指数与年平均气温呈显著正相关（$P < 0.05$），Pielou 均匀度指数与年平均降水量呈极显著正相关（$P < 0.01$），气温、降水、坡度、坡向对灌木层大部分多样性指数影响不显著。草本层多样性的关键影响因子为坡度和海拔：Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数与坡度呈极显著负相关（$P < 0.01$），坡度越大，草本层物种多样性越低；同时，Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数与海拔呈显著负相关（$P < 0.05$），但 Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数与海拔无显著关联，反映出高海拔生境下草本层物种多样性下降，但群落优势种的地位可能更突出；年平均气温、年平均降水量和坡向对草本层多样性未表现出显著影响。

2.4.2 植物 α 多样性空间自相关分析

对乔木层、灌木层和草本层植物 α 多样性指数采用全局空间自相关莫兰指数分析（表 2），结果表明，研究区样方植物 α 多样性指数的 M-Z 值均大于 2.58，M-P 值均小于 0.01，说明样方植物 α 多样性指数集聚分布的置信度为 99%；所有样方的莫兰指数均为 0 ～ 1，可见研究区植物的 α 多样性指数均为空间正相关，值越大空间相关性越明显，且乔木层＞草本层＞灌木层。利用高 / 低聚类分析植物 α 多样性指数是否在空间上存在高 / 低聚类，结果显示，灌木层 Pielou 均匀度指数的 G-Z 值为 1.233，G-P 值为 0.217，低于 90% 的置信度区间，说明其无显著高 / 低聚类；乔木层 Pielou 均匀度指数和灌木层 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数的 G-Z 值分别为 2.356、2.357、2.403、2.301，G-P 值分别为 0.018、0.018、0.016、0.021，在 95% 置信度区间，说明这 4 个植物 α 多样性指数存在高聚类。其余植物 α 多样性指数的 G-Z 值均大于 2.58，G-P 值均小于 0.01，在 99% 置信度区间，说明大多数植物 α 多样性指数在空间上存在显著的高聚类。

表 1 植物 α 多样性指数与区域环境影响因素的相关性分析 †

Table 1 Correlation analysis between plant α-diversity indices and regional environmental influencing factors

环境影响因素 Environmental influencing factors	乔木层 Arbor layer				灌木层 Shrub layer				草本层 Herb layer			
	R	*H*	*D*	*E*	*R*	*H*	*D*	*E*	*R*	*H*	*D*	*E*
年平均气温 Mean annual temperature	0.123	0.068	-0.004	-0.093	0.141*	0.118	0.091	0.047	-0.060	-0.065	-0.065	-0.034
年平均降水量 Mean annual precipitation	0.290**	0.252**	0.198**	-0.077	0.004	0.079	0.128	0.207**	-0.040	-0.014	0.048	-0.031
海拔 Elevation	-0.083	-0.023	0.044	0.083	-0.137*	-0.141*	-0.141*	-0.066	-0.150*	-0.138*	-0.112	-0.105
坡度 Slope	0.006	-0.044	-0.061	-0.082	-0.020	-0.056	-0.067	-0.085	-0.267**	-0.203**	-0.086	-0.046
坡向 Aspect	0.173*	0.170*	0.139*	0.032	-0.020	0.110	0.055	0.043	-0.063	-0.104	-0.113	-0.054

† * 表示 $P < 0.05$，存在显著相关性；** 表示 $P < 0.01$，存在极显著相关性。*R*、*H*、*D*、*E* 分别表示 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数。下同。
* indicates $P < 0.05$, meaning a significant correlation; ** indicates $P < 0.01$, meaning highly significant correlation. *R*, *H*, *D* and *E* represent the Patrick richness index, Shannon-Wiener diversity index, Simpson diversity index and Pielou evenness index, respectively. The same below.

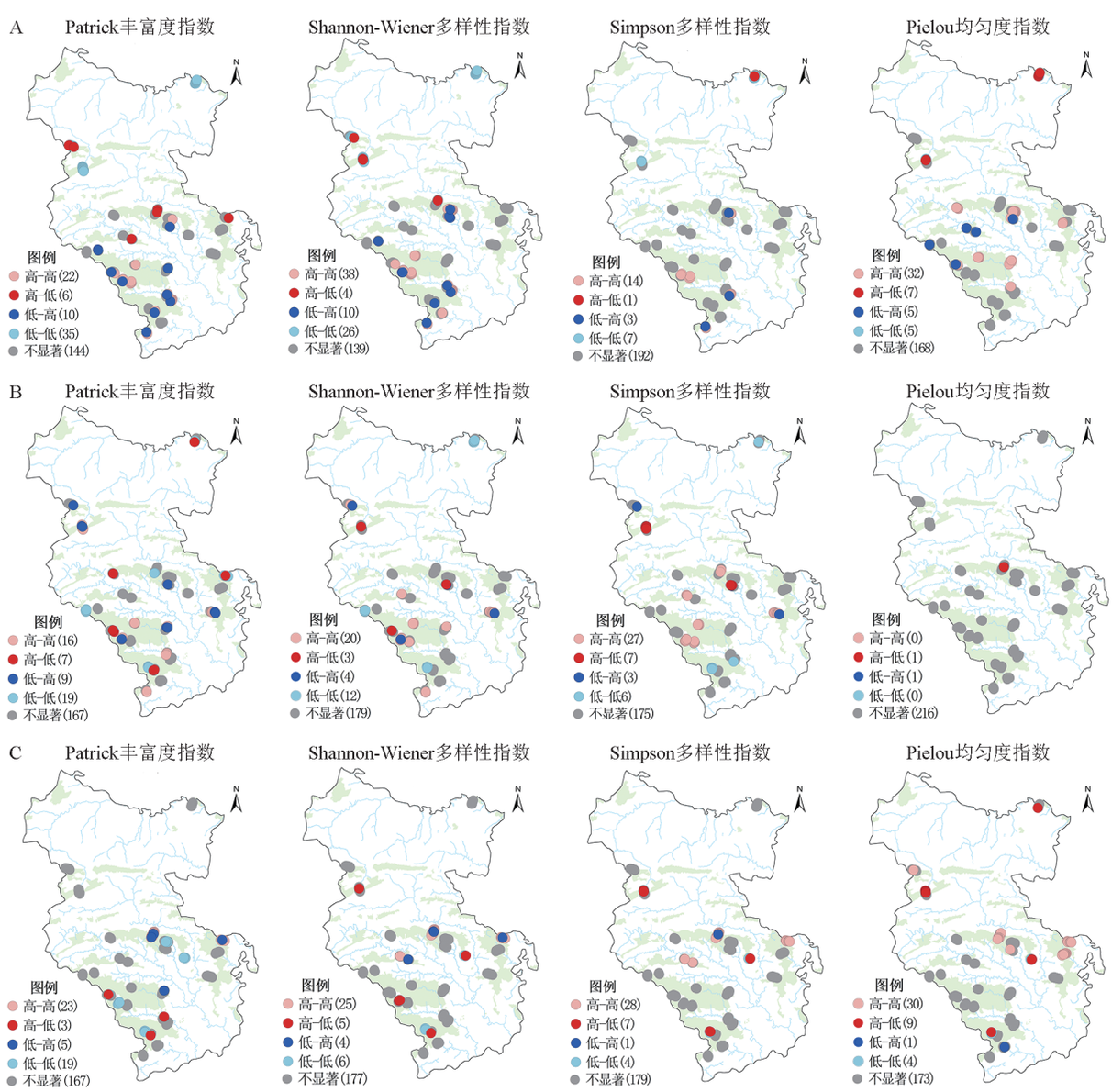
表 2 植物 α 多样性指数全局自相关性分析 †

Table 2 Global spatial autocorrelation analysis of plant α-diversity indices

	相关性 Correlation	乔木层 Arbor layer				灌木层 Shrub layer				草本层 Herb layer			
		R	*H*	*D*	*E*	*R*	*H*	*D*	*E*	*R*	*H*	*D*	*E*
莫兰指数分析 Moran's I analysis	莫兰指数 Moran's I	0.191	0.206	0.191	0.108	0.096	0.091	0.069	0.140	0.140	0.104	0.084	0.074
	显著性强度 M-Z	7.833	8.393	7.936	4.969	4.048	3.889	3.164	6.010	6.010	4.378	3.815	3.596
	显著性概率 M-P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
高 / 低聚类分析 Getis-Ord Gi analysis	高 / 低聚类指数 Getis-Ord Gi	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.007	0.005	0.005
	显著性强度 G-Z	6.121	5.599	4.257	2.356	2.357	2.403	2.301	1.233	4.155	3.241	2.629	2.760
	显著性概率 G-P	0.000	0.000	0.000	0.018	0.018	0.016	0.021	0.217	0.000	0.001	0.009	0.006

† M-Z，M-P 表示莫兰指数的显著性强度和显著性概率评估值；G-Z，G-P 表示高 / 低聚类指数的显著性强度和显著性概率评估值。
M-Z and M-P represent the significance intensity and probability evaluation values of the Global Moran's I index. G-Z and G-P represent the significance intensity and probability evaluation values of the General G index.

基于聚类与异常值进行局部空间自相关分析，清晰地反映出研究区各样方植物 α 多样性的空间聚类模式与显著性特征（图 5）。结果显示，研究区植物 α 多样性的局部空间格局以高值聚集（高 - 高）和低值聚集（低 - 低）同质性聚集为主，同时也存在少量高值被低值包围（高 - 低）和低值被高值包围（低 - 高）的异质性分布样方。乔木层的 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数的高 - 高显著性样方主要分布在林区南部和中部，样方数量分别为 22、38、14 和 32 个；低 - 低显著性样方主要分布在林区北部，样方数量分别为 35、26、7 和 5 个。这说明乔木层植物 α 多样性的空间分异明显，区域南北气候带过渡差异性对其影响显著。灌木层的 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数的高 - 高和低 - 低显著样方分布存在南北差异，Pielou 均匀度指数无显著性样方。这说明灌木层植物 α 多样性存在一定的南高北低的差异性，区域气候带差异性对其有一定的影响。草本层样方的 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数的高 - 高和低 - 低显著性样方分布交错零散，不存在明显的平面分布特征。植物 α 多样性高 - 高聚类区域形成了“生物多样性热点”核心区，说明群落结构复杂，物种间关系平衡，生态系统相对稳定；低 - 低聚类区域形成了“生物多样性冷点”区域，群落结构简单，生态系统退化或不稳定；低 - 高区域植物 α 多样性低，但被高



A、B、C 分别表示乔木层、灌木层和草本层。A, B and C represent the tree layer, shrub layer and herb layer, respectively.

图 5　植物 α 多样性的聚类分析

Fig. 5　Clustering analysis for plant α-diversity

多样性区域包围，这些区域可视为重要的“潜力区”，为植物多样性恢复的重点区域；高 - 低区域植物 α 多样性高，但被低多样性区域包围，多为“多样性孤岛”，是重点保护区。

3 讨 论

3.1 植物资源及其重要值的空间分布格局

结果显示，康南林业总场植物资源丰富，研究区有国家重点保护野生植物 25 种，其中乔木 7 种，藤本 1 种，草本 17 种。草本植物主要是兰科植物，分布在康南林业总场南部高密林区，属南部亚热带湿润气候的林下生境，更适宜兰科植物生长。建议根据调查数据库中濒危植物的地理分布，确定保护区域，基于保护物种的濒危现状与空间分异规律，进行分级保护，建立极小种群抢救性保护、生境重点保护和区域保护 [17] 策略，最终形成“物种 - 生境 - 区域”多尺度协同保护网络 [18]。

物种重要值特征显示，乔木层物种重要值为 100% 的单一树种样方有 4 个，占总乔木林地样方的 1.84%，分布在研究区的北部黄土区；第 1 优势树种重要值≥ 30.0% 的样方数量为 93 个，物种数为 2 ～ 10，占乔木样方的 42.85%，主要分布在北部和中部；第 1 优势树种重要值＜ 30.0% 的样方数量为 93 个，占乔木样方的 55.29%，主要分布在研究区的中部、北部和南部。总体空间特征显示，样方优势树种的重要值呈由南向北递增的变化趋势，而物种数量则呈现出由南向北递减的变化趋势。这种空间差异契合研究区自南向北从巴蜀山区过渡至黄土高原、从亚热带湿润气候过渡为暖温带半湿润气候的区域特性，是气候与地貌双重过渡带典型的植被分布格局。这一结果与张兴航等 [19] 提出的秦巴地区气候过渡带植物空间分布呈“南多北少”的结论一致。灌木层样方中，竹亚科植物作为重要值较高的优势种，在 49 个样方均有分布，这源于其突出的环境适应性与种间竞争力，这与李婷婷等 [20] 关于灌木层中箭竹等个别竞争力强的优势树种占据稳固优势地位的研究结论基本一致。草本层样方中，薹草属植物重要值较高的样方有 14 个，但总体来看，草本层样方内物种丰富，且各物种重要值分布均匀。

3.2 植物 α 多样性指数的层间差异及其地理分布格局

本研究通过对乔木层、灌木层和草本层 α 多样性指数进行分析，揭示了林区不同植被层在物种丰富度、多样性和均匀度方面的差异及其分布特征。林区植物 α 多样性整体表现为灌木层＞草本层＞乔木层，这与李旭华等 [21] 关于山西庞泉沟自然保护区森林植物多样性的研究结果一致。叠加分析表明，灌木层与草本层之间存在荫蔽抑制作用及竞争效应，特别是当乔木层物种丰富度≥ 9 时，其对灌木层和草本层的荫蔽抑制作用尤为显著。这与许格希等 [22] 提出的观点具有一定契合度，即当组成林冠的树种数量超过该阈值时，群落的功能丰富度会快速提升。同时，还存在乔木层、灌木层与草本层 α 多样性指数均较低或均较高的样方。其中，α 多样性指数均较低的样方可能受到人为干扰或立地条件较差的影响，而 α 多样性指数均较高的样方则表明该区域立地条件良好、生境质量较高 [23]。此外，草本层 α 多样性指数差异较大，这可能是由于样方所处的海拔、郁闭度等环境因素存在较大差异所致 [24]。

林区样方乔木层植物 α 多样性指数与年平均降水量呈极显著正相关，与坡向呈显著正相关，可能是乔木根茎发达，生物量为多年积累，受光照和降水梯度控制。乔木层 α 多样性指数与海拔的相关性不显著，乔木层 α 多样性垂直分布的“中间膨胀”效应不明显 [25]。灌木层与草本层的丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 多样性指数与海拔梯度呈显著负相关，均随着海拔升高而减小，灌木与草本植物的生长受小尺度生境影响显著，这可能是由于其根系较浅，同时受到高海拔区域低温、强风、土壤贫瘠等因素的综合作用。灌木层与草本层的 Pielou 均匀度指数与海拔无显著相关性，说明物种组成结构相对均匀，受非地理因素调控较强。灌木层与草本层的 α 多样性指数与坡向、年平均降水量和年平均气温相关性不显著，说明灌木与草本处于林下，生物量积累较少，受光照、干旱等因素的影响较小 [26]。而草本层 α 多样性指数与坡度呈显著负相关，可能是坡度导致土壤和水分流失，形成了特定的生境，而草本植物根系较浅，坡度大不利于其生长。

3.3 植物 α 多样性指数的空间聚类分析及保护修复策略

本研究借助空间自相关分析方法探究植物多样性的空间聚集特征，其整体自相关分析结果与局部聚类分析结果相一致。除灌木层 Pielou 均匀度指数高 / 低聚类不显著外，其余植物多样性指数都存在高 / 低聚类。其中乔木层植物的高 - 高聚类

与低 - 低聚类具有明显的纬度特征，具体表现为高 - 高聚类分布于南部，低 - 低聚类分布于北部，这一分布规律与乔木层植物 α 多样性存在显著纬度梯度差异的结论相吻合。高 - 高聚类区域具备该类植物生长所需的适宜光热水肥条件，多样的地形造就了丰富的适宜性小生境。在自然演替过程中，由于干扰较少，逐渐形成了复杂的生物群落。针对这类区域，应实施严格保护以维持其自然状态与生态过程，建议设立核心保护区或生态保育区，通过长期封山育林禁止或严格限制各类干扰活动，并加强监测研究，做好火灾、病虫害及外来物种入侵的防控工作。低 - 低聚类区域可能受自然条件恶劣、立地条件较差、历史干扰频繁或人为单一树种造林等因素影响，需通过人工干预促进近自然修复，提升生态功能与生物多样性。建议采用疏伐、开辟林窗、补植乡土树种等方式推动植被更新，同时改善立地条件，严格实施封禁措施，并构建生态廊道连通各物种源地。低 - 高异常区域的形成可能与局部小生境异常、外界干扰或种源迁入受阻等因素相关，是生物多样性恢复的“潜力区”。建议通过消除干扰源、开展针对性生态抚育、人工补植适配树种等手段，加速其自然演替进程。高 - 低异常区域的出现，可能由特殊小生境、历史遗留的古老群落以及特殊保护区域周边环境退化导致。对此，应进一步加强对区域内多样性“孤岛”的保护，防止其发生退化；同时开展种源地潜力调查，通过人工采种或育苗，为周边退化区域的生态恢复提供支持，并尝试构建生态廊道，打通其与其他高多样性区域的连接。此外，可依据数据库分析结果，明确这些样方的具体位置，制定针对性的生态保护与抚育方案，从而提升森林经营管理水平。

森林植物多样性的空间自相关及高 / 低聚类现象，是森林生态系统复杂空间结构的核心特征，主要源于环境异质性、不同生活型植物对环境因子的响应差异、植物繁殖传播扩散能力不同、种间相互作用（促进或抑制）以及历史遗留干扰效应等复杂生态过程的共同作用。同时，这种空间格局深刻影响着生物多样性维持、生态系统功能发挥、生态安全保障以及生态过程的空间动态 [27]。本研究对其驱动机制进行探究，不仅具有重要的理论意义，也为森林生物多样性保护、恢复与可持续管理提供了关键的空间信息支撑。未来研究需重点聚焦于环境因子的定量关联分析、跨尺度动态解析以及多维度多样性格局的探索。

4　结　论

康南林业总场林区植物物种丰富，样方调查显示，共有维管植物 1 065 种，其中国家重点保护野生植物 25 种。乔木层形成以壳斗科、桦木科、山茱萸科和松科为优势科的多树种共存种群，灌木层中竹亚科植物的重要值较高，草本层中薹草属植物的重要值较高。多数样方各层物种的重要值均较小，总体呈现出各层群落结构相对稳定的特点。

林区植物 α 多样性整体表现为乔木层＜草本层＜灌木层。各层均匀度均较高，表明群落结构相对稳定。尽管各层之间存在荫蔽与竞争作用，且空间异质性导致部分样方各层植物多样性同时偏高或偏低，但多数样方中各层植物的 α 多样性指数之间没有明显的关系。

林区乔木层植物 α 多样性指数与年平均降水量呈极显著正相关，与坡向呈显著正相关，但坡度、温度和海拔对其影响小；灌木层和草本层植物的 α 多样性指数与海拔呈显著负相关，这一结果与海拔梯度理论相符。草本层植物 α 多样性指数与坡度呈显著负相关，这一现象充分体现了植物在不同生境条件下的自适应能力。康南林业总场林区内存在较多植物 α 多样性指数高 - 高和低 - 低聚类的样方，高 - 低、低 - 高的聚类异常情况较少，据此可制定差异化生态保护策略，提升森林经营管理水平。

参考文献：

[1] 吴安驰 , 邓湘雯 , 任小丽 , 等 . 中国典型森林生态系统乔木层群落物种多样性的空间分布格局及其影响因素 [J]. 生态学报 , 2018,38(21):7727-7738.
Wu A C, Deng X W, Ren X L, et al. Biogeographic patterns and influencing factors of the species diversity of tree layer community in typical forest ecosystems in China[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(21):7727-7738.

[2] Loreau M, De Mazancourt C. Biodiversity and ecosystem stability: a synthesis of underlying mechanisms[J]. Ecology Letters,2013,16: 106-115.

[3] 罗也 , 何怀江 , 张忠辉 , 等 . 张广才岭不同林分密度下物种组成及其多样性 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2023,43(11):131-141.
Luo Y, He H J, Zhang Z H, et al. Species composition and diversity under different stand densities in Zhangguangcailing[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2023,43(11): 131-141.

[4] 宋厚娟 , 叶吉 , 蔺菲 , 等 . 取样面积对森林木本植物空间分布

格局分析的影响 [J]. 科学通报 ,2014,59(24):2388-2395.
Song H J, Ye J, Lin F, et al. Effects of sampling scales on spatial patterns of woody species in forests[J]. Chinese Science Bulletin, 2014,59(24):2388-2395.

[5] 戚赏 , 刘占时 , 杜丹 , 等 . 龙翔山植物群落空间异质性及其影响因子 [J]. 生态学杂志 ,2024,43(1):75-85.
Qi S, Liu Z S, Du D, et al. Spatial heterogeneity of plant community and its influencing factors in Longxiang mountain[J]. Chinese Journal of Ecology,2024,43(1):75-85.

[6] Sterner R W, Ribic C A, Schatz G E. Testing for life historical changes in spatial patterns of four tropical tree species[J]. Journal of Ecology,1986,74:621-633.

[7] 张金屯 . 植物种群空间分布的点格局分析 [J]. 植物生态学报 , 1998,22(4):344-349.
Zhang J T. Analysis of spatial point pattern for plant species[J]. Acta Phytoecologica Sinica,1998,22(4):344-349.

[8] 卫玺玺 , 晁鑫艳 , 郑景明 , 等 . 贺兰山东、西侧典型植物群落物种多样性差异及其影响因子 [J]. 生态环境学报 ,2024,33(4):520-530.
Wei X X, Chao X Y, Zheng J M, et al. Study on species diversity of typical plant communities and their influencing factors in the eastern and western Helan mountains[J]. Ecology and Environmental Sciences,2024,33(4):520-530.

[9] 梁红柱 , 刘丽丽 , 高会 , 等 . 太行山东坡中段植物多样性垂直分布格局及其驱动因素 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2022,30(7):1091-1100.
Liang H Z, Liu L L, Gao H, et al. Altitudinal distribution pattern and its driving factors of plant diversity in the middle section of the eastern slope of the Taihang mountain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2022,30(7):1091-1100.

[10] Tordoni E, Carmona C P, Toussaint A, et al. Global patterns and determinants of multiple facets of plant diversity[J]. Global Ecology and Biogeography,2024,33:e13823.

[11] 汤瑞麒 , 吴奇 , 郑蓉 , 等 . 浙江婺城南山落叶阔叶林物种组成及群落结构特征 [J]. 浙江农林大学学报 ,2025,42(1):23-33.
Tang R Q, Wu Q, Zheng R, et al. Species composition and community structure of deciduous broad-leaved forest in Wucheng Nanshan nature reserve, Zhejiang Province[J]. Journal of Zhejiang A & F University,2025,42(1):23-33.

[12] 骆丹 , 王春胜 , 刀保辉 , 等 . 云南德宏州西南桦天然林物种组成及多样性研究 [J]. 林业科学研究 ,2021,34(5):159-167.
Luo D, Wang C S, Dao B H, et al. Species composition and diversity of *Betula alnoides* natural forests at Dehong prefecture, Yunnan Province[J]. Forest Research,2021,34(5):159-167.

[13] 陈廷贵 , 张金屯 . 山西关帝山神尾沟植物群落物种多样性与环境关系的研究 I. 丰富度、均匀度和物种多样性指数 [J]. 应用与环境生物学报 ,2000,6(5):406-411.
Chen T G, Zhang J T. Plant species diversity of Shenweigou in Guandi mountains (Shanxi, China) I. richness, evenness, and diversity indexes[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology,2000,6(5):406-411.

[14] 程家琪 , 张建军 , 张燕妮 , 等 . 基于 Sentinel-2A 的融合多植被指数估算小流域生物多样性 [J]. 生态学杂志 ,2025,44(4):1297-1305.
Cheng J Q, Zhang J J, Zhang Y N, et al. Estimation of biodiversity in small watershed based on Sentinel-2A fused multi-vegetation index[J]. Chinese Journal of Ecology,2025,44(4):1297-1305.

[15] Qiu M, Zuo Q T, Wu Q S, et al. Water ecological security assessment and spatial autocorrelation analysis of prefectural regions involved in the Yellow River basin[J]. Scientific Reports,2022,12:5105-5105.

[16] 罗芹芹 , 刘凤莲 , 朱柯权 , 等 . 赤水河流域 (贵州段) 景观生态风险时空分异及空间自相关分析 [J]. 水土保持研究 ,2025,32(3):282-290.
Luo Q Q, Liu F L, Zhu K Q, et al. Spatiotemporal differentiation and spatial autocorrelation analysis of landscape ecological risk in the Chishui river basin (Guizhou section)[J]. Research of Soil and Water Conservation,2025,32(3):282-290.

[17] 许玥 , 臧润国 . 中国极小种群野生植物保护理论与实践研究进展 [J]. 生物多样性 ,2022,30(10):84-105.
Xu Y, Zang R G. Theoretical and practical research on conservation of wild plants with extremely small populations in China[J]. Biodiversity Science,2022,30(10):84-105.

[18] 吴长伟 , 王霓虹 , 杨茹 , 等 . 基于移动 GIS 的森林管护巡线定位和导航的研究与实现 [J]. 黑龙江工程学院学报 (自然科学版),2011,25(1):57-59.
Wu C W, Wang N H, Yang R, et al. The research and implementation of route positioning and navigation for forestry administration based on mobile GIS[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2011,25(1):57-59.

[19] 张兴航 , 张百平 , 姚永慧 , 等 . 秦巴山地植物多样性空间分异及其与气候因子的关系 [J]. 自然保护地 ,2023,3(2):104-122.
Zhang X H, Zhang B P, Yao Y H, et al. Spatial differentiation of plant diversity and its relationship with climatic factors in Qinling-Daba mountains[J]. Natural Protected Areas,2023,3(2):104-122.

[20] 李婷婷 , 鱼舜尧 , 吴傲淼 , 等 . 林分因子对云顶山不同人工林林下植物多样性的影响 [J]. 西北植物学报 ,2019,39(8):1463-1471.
Li T T, Yu S Y, Wu A M, et al. Effects of stand factors on understory species diversity of different plantations in Yunding mountain[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2019,39(8):1463-1471.

[21] 李旭华 , 邓永利 , 张峰 , 等 . 山西庞泉沟自然保护区森林群落物种多样性 [J]. 生态学杂志 ,2013,32(7):1667-1673.
Li X H, Deng Y L, Zhang F, et al. Species diversity of forest communities in Pangquangou nature reserve, Shanxi of China[J]. Chinese Journal of Ecology,2013,32(7):1667-1673.

[22] 许格希 , 史作民 , 唐敬超 , 等 . 海南尖峰岭热带山地雨林林冠层树种功能多样性特征 [J]. 应用生态学报 ,2016,27(11):3444-3454.
Xu G X, Shi Z M, Tang J C, et al. Functional diversity characteristics of canopy tree species of Jianfengling tropical montane rainforest on Hainan island, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(11):3444-3454.

[23] 曾珍 , 容丽 , 杨文松 , 等 . 梵净山自然保护区植物物种多样性沿海拔分布格局 [J]. 贵州师范大学学报 (自然科学版),2024,42(1):27-35.
Zeng Z, Rong L, Yang W S, et al. Elevational distribution pattern of plant species diversity in Fanjing Mountain Nature Reserve[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences),2024,42(1):27-35.

[24] 郝磊 , 陈胜 , 张祖绪 , 等 . 梵净山森林群落林下草本植物组成及多样性格局 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(8):114-128.
Hao L, Chen S, Zhang Z X, et al. Understory herbaceous composition and diversity patterns of forest community in Fanjingshan mountain[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(8):114-128.

[25] 丛明旸 , 曹迪 , 陈国平 , 等 . 燕山和太行山过渡区植物多样性垂直变化特点植物研究 [J]. 植物研究 ,2017,37(5):673-681.
Cong M Y, Cao D, Chen G P, et al. Vertical characteristics of plant diversity in transition between Mount. Yan and Mount. Taihang[J]. Bulletin of Botanical Research,2017,37(5):673-681.

[26] 吴奇 , 问青青 , 庄前进 , 等 . 浙江婺城南山落叶阔叶林树冠互补性对群落多样性的影响 [J]. 生态学报 ,2025,45(7):3330-3340.
Wu Q,Wen Q Q, Zhuang Q J, et al. Effects of crown complementarity on community diversity in the Nanshan deciduous broadleaf forest, Zhejiang Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(7):3330-3340.

[27] Wiegand T, Wang X G, Fischer S M, et al. Latitudinal scaling of aggregation with abundance and coexistence in forests[J]. Nature,2025,640:967-973.

[本文编校：戴欧琳]