

张卫红,马娟,赵睿智,等.宁夏森林生态系统植物多样性及群落稳定性[J].中国沙漠,2025,45(3):210-221.

# 宁夏森林生态系统植物多样性及群落稳定性

张卫红<sup>1</sup>,马娟<sup>1</sup>,赵睿智<sup>1</sup>,周伟<sup>1</sup>,赵心怡<sup>1</sup>,潘颜霞<sup>2</sup>

(1.宁夏回族自治区生态环境监测中心,宁夏 银川 750002; 2.中国科学院西北生态环境资源研究院 沙坡头沙漠研究试验站/干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室,甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 基于宁夏回族自治区10个森林生态系统样地的调查数据,系统分析了该地区森林生态系统的植物多样性及群落稳定性。研究共记录到202种植物,分布于54科124属,其中乔木层23种,灌木层31种,草本层148种。通过计算Sprengel相似性系数、重要值指数、多样性指数,以及运用Godron稳定性测定方法,评估了不同森林群落的物种组成差异性、物种重要性、多样性水平和稳定性特征。结果表明:宁夏森林群落的物种丰富度和多样性指数在不同样地间存在显著差异,丰富度指数最低为5,最高为72;多样性指数(Shannon-Wiener指数)最高为3.42,最低为1.33。群落稳定性分析显示,青海云杉群落的稳定性指数(Godron稳定性测定)为最高,接近稳定点(20,80),而华北落叶松群落的稳定性指数最低,偏离稳定点较远;群落物种多样性与稳定性显著正相关。

**关键词:** 宁夏; 森林生态系统; 植物多样性; 群落稳定性; 生态管理

**文章编号:** 1000-694X(2025)03-210-12

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00087

**中图分类号:** Q948

**文献标志码:** A

## 0 引言

森林生态系统是地球上最大的陆地生态系统,在维护全球生态平衡方面起着重要作用<sup>[1]</sup>。它们不仅为人类提供丰富的物质资源,还在气候调节、水土保持、空气净化和生物多样性保护等方面发挥着关键的生态功能<sup>[2]</sup>。尤其是,作为森林生态系统的核心组成部分,生物多样性对维持其稳定性和功能具有显著影响,生物多样性的丧失是导致生态系统变化的主要因素<sup>[3]</sup>。物种多样性能够显著提高森林生态系统的生产力和碳储量,并且其对生态系统功能的积极影响会随着时间的推移而增强<sup>[4]</sup>。此外,森林生态系统的生物多样性还通过影响土壤微生物群落结构而影响生态系统的碳储存能力<sup>[5]</sup>。因此,深入研究森林生态系统的生物多样性,对于保护生态环境和促进可持续发展具有重要的科学和实践意义<sup>[6]</sup>。

宁夏的森林生态系统作为中国西北地区的重要生态屏障,在保障区域生态安全、防治沙漠化及保护生物多样性方面发挥了至关重要的作用。同

时,它也是支撑黄河流域生态保护和高质量发展国家战略的重要组成部分<sup>[7]</sup>。近年来,关于宁夏森林生态系统植物群落结构和多样性的研究取得了显著进展,该地区的生物多样性和群落结构具有显著的干旱区特征,主要表现为物种多样性较低、群落结构相对简单,且植被分布受水分条件的强烈影响<sup>[8-10]</sup>。在多样的地形和气候背景下,宁夏形成了独特的山地森林和川地森林生态系统,山地森林生态系统主要分布在六盘山、贺兰山和罗山等天然森林集中区,这些地区的森林覆盖面积约为6.27万 $\text{hm}^2$ ,占宁夏总面积的0.94%<sup>[11]</sup>,六盘山的森林以落叶阔叶林为主,而贺兰山和罗山则以常绿针叶林为主<sup>[12-13]</sup>。

宁夏贺兰山国家级自然保护区的森林群落研究表明,贺兰山具有明晰的森林植被类型和垂直空间变化序列,显示出典型的温带干旱、半干旱山地特殊植被景观,包括8个植被型组、10个植被型、15个植被亚型、53个植被群落<sup>[14]</sup>。此外,植物优先保护级别研究确定了一级优先保护植物38种,二级优先保护植物90种<sup>[15]</sup>。宁夏罗山国家级自然保护区

收稿日期:2025-02-21; 改回日期:2025-04-24

资助项目:国家自然科学基金项目(32471969);宁夏回族自治区重点研发计划项目(2023BEG02039)

作者简介:张卫红(1975—),女,宁夏中卫人,正高级工程师,主要从事生态监测与治理研究。E-mail: zwh371@126.com

通信作者:潘颜霞(E-mail: panyanxia@lzb.ac.cn)

内的4种主要森林类型(青海云杉林、青海云杉+油松林、油松林、山杨林)共记录了58种植物,隶属27科39属,这些森林群落的乔木直径分布主要呈现倒“J”形和偏正态分布,而树高结构则均呈正态分布,显示出稳定增长型群落的特征<sup>[16]</sup>。宁夏六盘山自然保护区的森林群落调查结果表明,该区域拥有丰富的维管植物资源,共计96科361属896种,包括蕨类植物、裸子植物和被子植物<sup>[17]</sup>。研究通过多样性指数、丰富度指数和均匀度指数分析了该区的群落的物种多样性及其与环境的关系,揭示了不同植被类型的物种多样性指数顺序,其中落叶阔叶混交林具有较高的物种多样性<sup>[18]</sup>。综上,关于宁夏森林生态系统植物群落结构和多样性的研究取得了显著进展,但这些研究多关于单一森林类型或局部区域,难以全面反映整个宁夏区域的生态状况。因此,本研究旨在通过覆盖全区不同森林群落的综合性研究,更全面地理解和评估宁夏森林生态系统的植物群落结构、多样性及其对环境的响应,从而为宁夏乃至相似干旱地区的森林生态系统管理提供更为精确的科学指导和决策支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏回族自治区地处中国西北部,气候类型跨越暖温带半干旱区至中温带干旱区,具有明显的大陆性气候特征。该区域夏季炎热干燥,冬季寒冷,多年平均气温5.3~9.9℃,年降水量分布不均,为166.9~647.3 mm,北少南多,差异明显<sup>[19]</sup>。森林资源在宁夏的分布也呈现南多北少的总体趋势,其中南部湿润区的六盘山及其外围地区森林资源较为集中,而中部半干旱区和北部干旱荒漠区则较少<sup>[7]</sup>。

本研究选取的10个森林样地广泛分布于宁夏回族自治区的不同地理单元,包括固原市的泾源县、隆德县、原州区和西吉县,银川市的灵武市和贺兰县,石嘴山市的平罗县,以及吴忠市的盐池县,海拔1 107.2~2 239.1 m(图1),样地基本信息见表1。不同经纬度和海拔的样地广泛分布,代表了宁夏地区从南到北、从低海拔到高海拔的多样化地理和气候条件,对研究森林生态系统多样性和环境适应性具有显著的代表性。

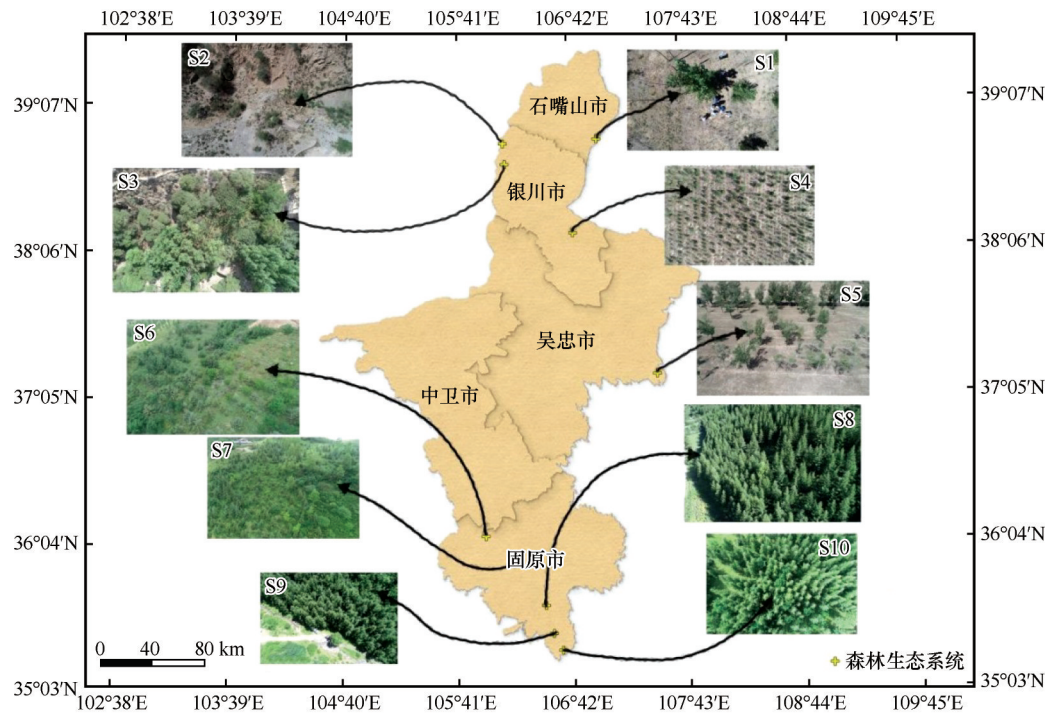


图1 宁夏森林群落调查样地分布  
Fig.1 Distribution map of forest community survey sample plots in Ningxia

1.2 研究方法

按照2024年中国环境监测总站颁发的《全国生态质量监督监测技术指南(试行)》方案要求,每个

样地面积设定为100 m×100 m,样地内部随机布设3组样方,每组3个,以实现乔木、灌木和草本层的分层监测,共计9个样方。乔木层样方面积为

表 1 样地位置及概况

Table 1 The location and general situation of the sample plots

样地编号	群落类型	中心点经纬度	海拔/m	坡向	坡度/(°)	郁闭度
S1	银白杨(人工林, <i>Populus alba</i> )	38.77744°N, 106.75686°E	1 107.2	ES	3~5	0.26~0.62
S2	榆树(人工林, <i>Ulmus pumila</i> )	38.74928°N, 105.91312°E	1 956.0	N	16~30	0.21~0.64
S3	白柳(天然林, <i>Salix alba</i> )	36.60922°N, 105.92803°E	1 527.5	EN	16~30	0.20~0.70
S4	侧柏(人工林, <i>Platycladus orientalis</i> )	38.14042°N, 106.53311°E	1 248.2		0~2	0.26~0.67
S5	小叶杨(人工林, <i>Populus simonii</i> )	37.17636°N, 107.26292°E	1 620.8	E	0~2	0.15~0.55
S6	山杏(人工林, <i>Prunus sibirica</i> )	36.08224°N, 105.74223°E	2 238.8	W	16~30	0.30~0.78
S7	青海云杉(人工林, <i>Picea crassifolia</i> )	35.90386°N, 106.13914°E	2 239.1	W	16~30	0.30~0.85
S8	华北落叶松(人工林, <i>Larix principis-rupprechtii</i> )	35.60935°N, 106.25889°E	2 068.5	WN	16~30	0.40~0.80
S9	云杉(人工林, <i>Picea asperata</i> )	35.41835°N, 106.32294°E	1 994.3	EN	16~30	0.35~0.80
S10	华北落叶松(人工林, <i>Larix principis-rupprechtii</i> )	35.30323°N, 106.40127°E	1 997.0	WN	6~15	0.45~0.75

20 m×20 m,灌木层样方面积为 5 m×5 m,草本层样方面积为 1 m×1 m。样方采用嵌套式布局,即每个乔木层样方内部嵌套灌木层和草本层样方,以便对不同植被层次进行系统性分析。

乔木层记录物种名称、多度/密度、高度、冠幅、胸径、郁闭度、地表凋落物平均厚度、地表凋落物鲜重/干重、优势种、外来入侵物种等。灌木层记录物种名称、多度/密度、高度、基径、丛幅、群落总盖度、分种盖度、优势种、外来入侵物种等。草本层需记录物种名称、多度/密度、高度、群落总盖度、分种盖度、关键种地上生物量(鲜重/干重)、生活型(一、二年生草本植物比例)、优势种、退化指示种、外来入侵物种等。

1.3 数据分析方法

通过计算不同样地植物物种相似性指数 Sprenson 系数,对森林样地植物物种差异性进行分析<sup>[20]</sup>。

Sprenson 系数= $[2C/(A+B)]\times 100\%$  (1)  
式中: $A$ 代表某一样地全部物种数; $B$ 代表另一样地全部物种数; $C$ 代表  $A$ 、 $B$  区域共有物种数。

重要值( $IV$ )是用来表示某个物种在群落中的相对重要性的一个综合数值,综合考虑了物种的多度、盖度、频度等多个指标,在植被生态学研究中被广泛应用<sup>[21]</sup>。乔木层、灌木层和草本层植物的重要值<sup>[22]</sup>分别根据式(2)~(4)进行计算:

$IV=(RD+RA+RH)/3$  (2)

$IV=(RA+RC+RH)/3$  (3)

$IV=(RC+RH+RA+RAG)/4$  (4)

式中: $IV$ 为重要值; $RD$ 为相对优势度; $RA$ 为相对多

度; $RH$ 为相对高度; $RC$ 为相对盖度; $RAG$ 为相对地上生物量。

统计样地中乔木层、灌木层、草本层植物的科、属、种,并计算多样性指数。本文选取 Patrick 丰富度指数( $R$ )、Shannon-Wiener 指数( $H$ )、Simpson 指数( $D$ )、Pielous 均匀度指数( $J$ )4 个常用指标对研究区森林群落物种多样性进行分析<sup>[23]</sup>。

$R=S$  (5)

$H=-\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$  (6)

$D=1-\sum_{i=1}^S P_i^2$  (7)

$J=\frac{H}{\ln S}$  (8)

式中: $S$ 代表物种数目; $P_i$ 是第  $i$  种的出现概率。

运用当前国际上广泛采用的 Godron 稳定性测定方法<sup>[24]</sup>,并结合郑元润<sup>[25]</sup>对 Godron 所做的改进数学方法评价群落的稳定性。首先将群落中所有植物的频度按照从大到小的顺序进行排列。接着,计算总种数倒数的累计百分数以及相对频度的累积百分数,并据此绘制出两者的散点图。之后,对这个散点图进行平滑曲线的模拟操作。在这个过程中,我们规定了一个稳定性参考点,它是由平滑曲线与直线方程的交点所确定的。其中,直线方程为式(10),而平滑曲线模型的表达式为式(9)。通过将式(10)代入式(9)来求解交点坐标时,会得到两个解,一个解的值远大于 100,另一个解的值处于 0~100 内。考虑到我们的研究情况,交点坐标应该位于第一象限,所以我们选择 0~100 内的解,以此解与



稳定点(坐标为(20,80))进行比较。当该交点坐标越趋近于点(20,80)时,就表明该群落的稳定性越高;反之,若偏离该点越远,则说明群落的稳定性越低。

$$y = ax^2 + bx + c \quad (9)$$

$$y = -x + 100 \quad (10)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 植物群落组成及相似性

宁夏森林样地中4个为落叶阔叶林(S1、S3、S5、S6),分别为银白杨群落、白柳群落、小叶杨群落、山杏群落;2个为常绿针叶林(S4、S7),分别为侧柏群落、青海云杉群落;其他为针叶与阔叶/落叶混交林(S2、S8、S9、S10),分别为榆树、云杉、华北落叶松群落。调查共记录了3 992个独立个体,其中,乔木层的个体数为1 034,灌木层为300,草本层为2 658,这些植物涵盖了54科、124属和202种,乔木层10科15属23种,灌木层13科25属31种,草本层31科84属148种。

在该区域的植物类群中,菊科(Asteraceae)、豆科(Fabaceae)和蔷薇科(Rosaceae)为最具优势的科类,分别占总植物种类的12.56%、12.06%和10.05%(表2)。禾本科(Poaceae)植物的种类占比为9.55%,胡颓子科(Elaeagnaceae)和毛茛科(Ranunculaceae)植物分别占总植物种类的5.53%和4.52%。此外,忍冬科(Caprifoliaceae)、松科(Pinaceae)和苋科(Amaranthaceae)植物的种类占比均为3.52%,杨柳科(Salicaceae)植物占比为3.02%;其他科的占比相对较少,且在一些科中出现了单科、单属或单种现象。

Sprenson系数为0~38.71%(表3),表明不同森林群落之间的物种组成存在较大差异。其中,S1与S2之间的相似性最高,达到38.71%,两个森林群落的物种组成较为相似;S10与S8、S9的Sprenson系数也相对较高,分别为30.77%和33.66%;S4与S2、S3、S7、S9、S10之间的相似性系数均为0,S4森林群落物种数仅为5,物种组成与其他森林群落差异较大。

从共有物种数来看,不同群落之间的共有物种数也存在显著差异。S10与S8、S9之间的共有物种数最多,分别达到16、17种,这两个群落在地理环境或生态条件上较为接近;S6与S7之间的共有物种数也较多,为15种;相反,S4与S2、S3、S7、S9、S10

群落之间的共有物种数均为0,显示出其群落的物种组成高度独特。

### 2.2 植物群落重要值特征

在宁夏森林群落的乔木层中,华北落叶松重要值(IV)高达0.606850,显著占据了生态位的主导地位(表4),这一高值反映了华北落叶松在群落中的高相对多度、相对优势度和相对高度,其耐寒和耐旱的特性在宁夏多变的气候条件下仍能保持较高的生态位,对于维持森林结构和功能至关重要。其次是小叶杨,重要值为0.592391,生长快速和适应性强的特点使其在水土保持和生态恢复中扮演着重要角色。榆树的重要值0.361476,作为本土树种,它在提供栖息地和维持生态平衡方面发挥着重要作用。白柳的重要值0.191937,在河岸带和湿地环境中具有特别的重要性,有助于河岸保护和水分调节。云杉和青海云杉的重要值分别为0.178121和0.118248,这两种树种的存在对提高森林生态系统的碳储存能力和气候调节功能有一定贡献。侧柏的重要值0.096082,作为耐旱树种,它在宁夏干旱地区的森林生态系统中发挥着重要的生态作用。油松的重要值0.031251,虽然相对较低,但作为一种松科植物,在某些特定生境中发挥着不可或缺的生态功能。

在灌木层中,紫丁香以其重要值0.466663显著地占据了生态位的主导地位。土庄绣线菊以0.382845的重要值,成为林下植被中的关键物种,可能通过提供食物资源和栖息地来增加生态系统的生物多样性。沙枣以0.324926的重要值位居第三,合头藜以0.322267的重要值位列第四,而互叶醉鱼草以0.202626的重要值位居第五。此外,酸枣重要值0.191694,胡枝子重要值0.171024,也是重要的灌木层物种。

草本层中,细叶藎草重要值为0.385840,处于较高水平,具有显著的优势地位。重要值处于0.3~0.1区间的物种包括短柄草(0.330244)、猪毛菜(0.282245)、白莲蒿(0.174499)和东方草莓(0.167301),这些物种在草本层中相对重要性较高,是草本层生态结构的重要组成部分。鹅观草(0.125597)、赖草(0.101069)、黄腺香青(0.091889)、等齿委陵菜(0.085287)和百里香(0.071131)重要值相对较低,但它们共同参与构建了草本层的物种组成格局,反映出草本层物种组成的复杂性和多样

表 2 宁夏森林群落优势科的属数和物种数

Table 2 The number of genera and species of dominant families in forest communities, Ningxia

生活型	科名	属数	物种数	生活型	科名	属数	物种数
乔木	松科(Pinaceae)	2	7	灌木	苋科(Amaranthaceae)	5	6
	蔷薇科(Rosaceae)	3	5		忍冬科(Caprifoliaceae)	3	6
	杨柳科(Salicaceae)	2	3		伞形科(Apiaceae)	3	5
	豆科(Fabaceae)	2	2		石竹科(Caryophyllaceae)	3	5
	柏科(Cupressaceae)	1	1		牻牛儿苗科(Geraniaceae)	2	4
	胡颓子科(Elaeagnaceae)	1	1		茜草科(Rubiaceae)	2	4
	桦木科(Betulaceae)	1	1	草本	紫草科(Boraginaceae)	2	2
	壳斗科(Fagaceae)	1	1		木贼科(Equisetaceae)	1	2
	榆科(Ulmaceae)	1	1		车前科(Plantaginaceae)	1	2
	苦木科(Simaroubaceae)	1	1		蓼科(Polygonaceae)	1	2
灌木	胡颓子科(Elaeagnaceae)	10	11		玄参科(Scrophulariaceae)	2	2
	豆科(Fabaceae)	4	6		莎草科(Cyperaceae)	1	4
	杨柳科(Salicaceae)	1	3		兰科(Orchidaceae)	1	1
	木犀科(Oleaceae)	1	2		百合科(Liliaceae)	1	1
	苋科(Amaranthaceae)	1	1		瑞香科(Thymelaeaceae)	1	1
	鼠李科(Rhamnaceae)	1	1		石蒜科(Amaryllidaceae)	1	3
	白刺科(Nitrariaceae)	1	1		桔梗科(Campanulaceae)	1	2
	绣球科(Hydrangeaceae)	1	1		报春花科(Primulaceae)	1	1
	瑞香科(Thymelaeaceae)	1	1		景天科(Crassulaceae)	1	1
	五福花科(Adoxaceae)	1	1		荨麻科(Urticaceae)	1	1
	玄参科(Scrophulariaceae)	1	1		堇菜科(Violaceae)	1	3
	桦木科(Betulaceae)	1	1		龙胆科(Gentiana)	1	1
	忍冬科(Caprifoliaceae)	1	1		蒺藜科(Zygophyllaceae)	1	1
	菊科(Asteraceae)	12	25		远志科(Polygalaceae)	1	1
	禾本科(Poaceae)	12	19		鸢尾科(Iridaceae)	1	1
	豆科(Fabaceae)	9	16		列当科(Orobanchaceae)	1	1
	蔷薇科(Rosaceae)	6	15		蕨科(Pteridaceae)	1	1
	毛茛科(Ranunculaceae)	5	9				

性,不同重要值的物种共同维持着草本层的生态功能和稳定性。

2.3 植物群落多样性

在宁夏森林群落的调查中,各群落的物种丰富度表现出显著差异,丰富度指数 5~72(表 5)。S6 样地的物种丰富度最高,达到 72 种,乔木层以山杏、云杉为主,灌木层以土庄绣线菊、沙棘为主,草本层以赖草、短柄草和细叶薹草为主。S4 样地的物种丰富

度最低,仅为 5 种,主要是侧柏、合头藜和猪毛菜。

各样地的 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )为 1.334628~3.424373, Simpson 优势度指数( $D'$ )为 0.663115~0.945973, 而 Pielou 均匀度指数( $J'$ )为 0.717844~0.869587。S6 样地的多样性指数( $H'$ )和优势度指数( $D'$ )最高,表明该样地物种多样性较高,优势种突出;S4 样地虽然物种多样性指数( $H'$ )最低,但其优势度指数( $D'$ )也最低,优势种不明显,均匀度指数( $J'$ )较高;S2 样地多样性指数( $H'$ )和优势度指数

表 3 宁夏不同森林群落共有物种数和相似性指数

Table 3 The number of common species and similarity indices of different forest communities, Ningxia

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
S1		38.71	5.41	10.53	26.67	4.65	7.55	3.23	3.39	2.94
S2	6		19.05	0.00	5.71	6.59	6.90	2.99	6.25	5.48
S3	1	4		0.00	9.76	12.37	15.62	5.48	17.14	10.13
S4	1	0	0		8.70	2.53	0.00	3.64	0.00	0.00
S5	4	1	2	1		4.44	3.51	24.24	9.52	11.11
S6	2	3	6	1	2		26.55	18.03	21.85	18.75
S7	1	2	5	0	1	15		15.73	25.58	10.53
S8	1	1	2	1	8	11	7		23.16	30.77
S9	1	2	6	0	3	13	11	11		33.66
S10	1	2	4	0	4	12	5	16	17	

注：上三角为不同森林群落物种相似性指数 Sprenson 系数(%), 下三角为不同森林群落间共有物种数。

(D)均处于中等水平,优势物种白柳、榆树、互叶醉鱼草等不明显,其他物种数量也较大,均匀度指数(J)最高。

样地物种丰富度(R)与 Shannon-Wiener 多样性指数(H)极显著正相关( $r=0.946$ ,  $P<0.01$ ),与 Simpson 优势度指数(D)显著正相关( $r=0.84$ ,  $P<0.05$ );样地 Shannon-Wiener 多样性指数(H)与 Simpson 优势度指数(D)极显著正相关( $r=0.966$ ,  $P<0.01$ );其他指数间无显著相关性( $P>0.05$ )。

2.4 植物群落稳定性

宁夏森林样地的植物群落稳定性分析结果表明,所有样地植物群落稳定性模拟曲线的 $R^2$ 值均较高(图 2),Godron 稳定性测定方法可用于评价宁夏森林植物群落的稳定性特征。不同植物群落稳定性拟合曲线与 $y=-x+100$ 直线的交点距稳定点(20, 80)的欧式距离表现为 $S8>S4>S3>S5>S6>S10>S2>S1>S9>S7$ ,即植物群落的稳定性表现为 $S7>S9>S1>S2>S10>S6>S5>S3>S4>S8$ 。其中稳定性最高的是 S7 青海云杉群落和 S9 云杉群落,稳定性最低的是 S8 华北落叶松群落和 S4 侧柏群落。

2.5 植物群落物种多样性与稳定性关系

通过分析森林群落的物种多样性指数与 Godron 稳定性测定结果,发现物种多样性与群落稳定性之间存在显著的相关性。Shannon-Wiener 指数(H)与群落稳定性指数呈显著正相关( $r=0.78$ ,  $P<0.05$ ),Patrick 丰富度指数(R)与稳定性指数也呈显

著正相关( $r=0.72$ ,  $P<0.05$ )。此外,从图 2 的稳定性模拟曲线可以看出,物种多样性较高的样地(如 S6 和 S7)稳定性曲线更接近稳定点(20, 80),而物种多样性较低的样地(如 S4 和 S8)则偏离稳定点较远。

3 讨论

宁夏地区地形和气候的多样性孕育了落叶阔叶林、常绿针叶林以及针阔混交林等多样的森林类型,这种丰富的植被结构对于维护生态系统的复杂性和稳定性至关重要。落叶阔叶林和常绿针叶林的存在不仅体现了该地区植物群落结构的复杂性,而且对于保持水土、调节气候、提供生物多样性保护等生态服务具有重要作用。前期在浑善达克沙地的研究中也观察到了类似的群落类型,强调了地形条件和土壤对群落分布和物种多样性的显著影响,表明在不同生境条件下,地形特征对森林群落的多样性和分布模式有着普遍的影响<sup>[26-27]</sup>。李红丽<sup>[28]</sup>在浑善达克沙地沙漠化过程及其植被恢复的研究中指出,不同森林类型的分布与土壤水分条件密切相关,进一步强调了水热条件对森林群落结构的影响。这些研究结果表明,为了有效保护和恢复宁夏地区的森林生态系统,需要综合考虑地形、气候和土壤等因素的综合作用。

宁夏森林群落样地中记录的 3 992 个独立个体涵盖了 54 科、124 属和 202 种,显示出较高的物种丰富度,尤其是草本层物种多样性较高。草本层的高物种多样性被认为是生态系统健康和稳定性的一个重要指标,Bai 等<sup>[29]</sup>在内蒙古高原的研究中发现,

表 4 宁夏森林群落主要物种组成及重要值

Table 4 Main species composition and important value of forest community in Ningxia

	科	属	物种	重要值
乔木	松科(Pinaceae)	落叶松属( <i>Larix</i> )	华北落叶松( <i>Larix gmelinii</i> var. <i>principis-rupprechtii</i> )	0.606850
	杨柳科(Salicaceae)	杨属( <i>Populus</i> )	小叶杨( <i>Populus simonii</i> )	0.592391
	榆科(Ulmaceae)	榆属( <i>Ulmus</i> )	榆( <i>Ulmus pumila</i> )	0.361476
	杨柳科(Salicaceae)	柳属( <i>Salix</i> )	白柳( <i>Salix alba</i> )	0.191937
	松科(Pinaceae)	云杉属( <i>Picea</i> )	云杉( <i>Picea asperata</i> )	0.178121
	蔷薇科(Rosaceae)	杏属( <i>Prunus</i> )	山杏( <i>Prunus armeniaca</i> )	0.154488
	松科(Pinaceae)	云杉属( <i>Picea</i> )	青海云杉( <i>Picea crassifolia</i> )	0.118248
	柏科(Cupressaceae)	侧柏属( <i>Platycladus</i> )	侧柏( <i>Platycladus orientalis</i> )	0.096082
	桦木科(Betulaceae)	桦木属( <i>Betula</i> )	白桦( <i>Betula platyphylla</i> )	0.047920
	松科(Pinaceae)	松属( <i>Pinus</i> )	油松( <i>Pinus tabuliformis</i> )	0.031251
灌木	木樨科(Oleaceae)	丁香属( <i>Syringa</i> )	紫丁香( <i>Syringa oblata</i> )	0.466663
	蔷薇科(Rosaceae)	绣线菊属( <i>Spiraea</i> )	土庄绣线菊( <i>Spiraea ouensanensis</i> )	0.382845
	胡颓子科(Elaeagnaceae)	胡颓子属( <i>Elaeagnus</i> )	沙枣( <i>Elaeagnus angustifolia</i> )	0.324926
	苋科(Amaranthaceae)	合头藜属( <i>Sympegma</i> )	合头藜( <i>Sympegma regelii</i> )	0.322267
	玄参科(Scrophulariaceae)	醉鱼草属( <i>Buddleja</i> )	互叶醉鱼草( <i>Buddleja alternifolia</i> )	0.202626
	胡颓子科(Elaeagnaceae)	沙棘属( <i>Hippophae</i> )	中国沙棘( <i>Hippophae rhamnoides</i> subsp. <i>sinensis</i> )	0.201374
	鼠李科(Rhamnaceae)	枣属( <i>Ziziphus</i> )	酸枣( <i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>spinosa</i> )	0.191694
	豆科(Fabaceae)	胡枝子属( <i>Lespedeza</i> )	胡枝子( <i>Lespedeza bicolor</i> )	0.171024
	蔷薇科(Rosaceae)	栒子属( <i>Cotoneaster</i> )	水栒子( <i>Cotoneaster multiflorus</i> )	0.146442
	豆科(Fabaceae)	锦鸡儿属( <i>Caragana</i> )	柠条锦鸡儿( <i>Caragana korshinskii</i> )	0.089982
草本	莎草科(Cyperaceae)	薹草属( <i>Carex</i> )	细叶薹草( <i>Carex duriuscula</i> subsp. <i>stenophylloides</i> )	0.385840
	禾本科(Poaceae)	短柄草属( <i>Brachypodium</i> )	短柄草( <i>Brachypodium sylvaticum</i> )	0.330244
	苋科(Amaranthaceae)	猪毛菜属( <i>Salsola</i> )	猪毛菜( <i>Salsola collina</i> )	0.282245
	菊科(Asteraceae)	蒿属( <i>Artemisia</i> )	白莲蒿( <i>Artemisia sacrorum</i> )	0.174499
	蔷薇科(Rosaceae)	草莓属( <i>Fragaria</i> )	东方草莓( <i>Fragaria orientalis</i> )	0.167301
	禾本科(Poaceae)	披碱草属( <i>Elymus</i> )	鹅观草( <i>Elymus kamoji</i> )	0.125597
	禾本科(Poaceae)	赖草属( <i>Leymus</i> )	赖草( <i>Leymus secalinus</i> )	0.101069
	菊科(Asteraceae)	香青属( <i>Anaphalis</i> )	黄腺香青( <i>Anaphalis aureopunctata</i> )	0.091889
	蔷薇科(Rosaceae)	委陵菜属( <i>Potentilla</i> )	等齿委陵菜( <i>Potentilla simulatrix</i> )	0.085287
	唇形科(Lamiaceae)	百里香属( <i>Thymus</i> )	百里香( <i>Thymus mongolicus</i> )	0.071131

草本层的物种多样性与生态系统的生产力和稳定性密切相关,强调了保护和管理草本层物种多样性对于维护生态系统功能的重要性。放牧活动对草本层物种多样性的影响显著,合理的放牧管理对于维持草本层的多样性至关重要<sup>[30]</sup>,禁牧措施在宁夏地区的实施有效地减缓了过度放牧对生态系统的负面影响,促进了植被覆盖的恢复和生物多样性的

增加。

在宁夏森林样地中,菊科、豆科和蔷薇科作为优势科类的存在,不仅体现了这些植物群体的生态适应性和竞争力,而且它们在生态系统中扮演着关键角色。菊科植物具有广泛的适应多变环境的能力,而豆科植物通过固氮作用对土壤肥力和养分循环起到积极影响,蔷薇科植物作为灌木层的主要组



表 5 宁夏森林群落植物物种多样性指数  
Table 5 Plant species diversity index of forest  
community in Ningxia

样地 编号	Patrick 丰富 度指数( <i>R</i> )	Shannon-Wiener 指数( <i>H</i> )	Simpson 指数( <i>D</i> )	Pielous 均匀 度指数( <i>J</i> )
S1	13	2.022913	0.825633	0.788676
S2	18	2.513428	0.897469	0.869587
S3	24	2.657591	0.898071	0.836232
S4	5	1.334628	0.663115	0.829251
S5	17	2.033805	0.803963	0.717844
S6	72	3.424373	0.945973	0.800711
S7	40	2.755864	0.892065	0.747074
S8	48	2.833742	0.904724	0.732006
S9	46	3.089544	0.918483	0.806956
S10	55	3.134854	0.928036	0.782279

成部分,在维持森林结构和功能方面发挥着重要作用<sup>[28]</sup>。此外,宁夏森林样地中出现的单科、单属或单种现象揭示了特有物种对特定环境条件的高度适应性。王璇等<sup>[31]</sup>在中国植被图的研究中强调了特有物种在生物多样性保护中的重要性,这些单一物种的存在不仅丰富了生物多样性,还可能对生态系统的功能和稳定性产生深远影响。

宁夏森林群落中的重要值特征揭示了特定物种在生态系统中的主导作用及其生态位。华北落叶松在乔木层中的重要值显著,这不仅反映了其在群落中的高相对多度和优势度,也暗示了其在生态系统中的基石地位。华北落叶松的耐寒耐旱特性使其在宁夏多变气候下保持生态优势,对于森林的水土保持和气候调节功能至关重要。李新荣等<sup>[32]</sup>在黑河流域的研究也指出,落叶松属在干旱区森林生态系统中具有重要的生态价值。小叶杨的重要值紧随其后,其快速生长和适应性强的特点使其在生态恢复和水土保持中扮演关键角色<sup>[26]</sup>。榆树的重要值也较高,其作为本土树种,在维持生态平衡和提供栖息地方面发挥着重要作用。灌木层中紫丁香和草本层中细叶藁草的重要值显著,灌木层物种多样性对生态系统服务功能具有重要贡献<sup>[33]</sup>,林下冠层植被能够为动物提供食物资源和栖息地等,草本层的高物种多样性对生态系统稳定性和生产力具有重要影响<sup>[26]</sup>。

宁夏森林群落的物种丰富度和多样性指数的变异性揭示了不同样地在生物多样性方面的显著

差异。S6样地的物种丰富度最高,其位于宁夏南部六盘山自然保护区,特定的生境条件如土壤肥力、水分可用性以及光照条件等都较好,这些条件共同促进了不同植物种类的生长和繁衍。在这样的生境下,乔木层以山杏、云杉为主,它们为下层的灌木和草本植物提供了必要的遮阴和微气候条件,从而维持了群落的复杂性和多样性<sup>[34]</sup>。灌木层以土庄绣线菊、沙棘为主,这些植物不仅为当地野生动物提供食物和栖息地,还有助于土壤保持和养分循环。草本层以赖草、短柄草和细叶藁草为主,这些植物在快速利用土壤养分和水分方面表现出色,进一步增强了群落的物种丰富度。这种多样化的物种组成有助于提高生态系统的稳定性和对环境变化的适应能力,反映了一个健康生态系统的典型特征<sup>[35]</sup>。相反,位于宁夏北部的S4样地物种丰富度最低,该样地为人工侧柏林,侧柏对干旱环境的适应性以及人工林分管理影响物种多样性,侧柏作为一种耐旱树种,能够在水分条件较差的环境中生存,但这种单一的植被结构限制了其他物种的共存性<sup>[36]</sup>。此外,人工林往往具有较为均一的林分结构和树种组成,导致生物多样性的降低,因为自然演替过程中的多样性和复杂性被简化<sup>[31]</sup>。

Shannon-Wiener 多样性指数(*H*)和 Simpson 优势度指数(*D*)的高值表明 S6 样地不仅物种多样性高,而且优势种明显,该样地的生态位分化和物种共存机制共同主导这一过程<sup>[37]</sup>。而 S4 样地的低多样性指数和优势度指数进一步表明该样地的物种组成较为单一,环境因素和物种竞争均影响其物种多样性<sup>[26]</sup>。S2 样地的中等多样性指数和优势度指数,以及最高的均匀度指数(*J*),表明该样地的物种分布较为均匀,没有明显的主导物种,这种多样性和均匀度特征对于维持生态系统的稳定性和抵御外来干扰具有重要意义<sup>[38]</sup>。物种丰富度(*R*)与 Shannon-Wiener 多样性指数(*H*)之间的极显著正相关,以及与 Simpson 优势度指数(*D*)之间的显著正相关,表明在宁夏森林群落中,物种数量的增加往往伴随着物种多样性的提高和优势种的形成<sup>[30]</sup>,这种关系在生态学中是普遍存在的,因为它反映了物种多样性与群落稳定性之间的关系<sup>[29]</sup>。

宁夏森林样地的植物群落稳定性分析揭示了不同森林类型在生态系统稳定性上的差异。Godron 稳定性测定方法的应用表明,该方法能有效评估宁夏森林植物群落的稳定性特征,曹成有等<sup>[39]</sup>



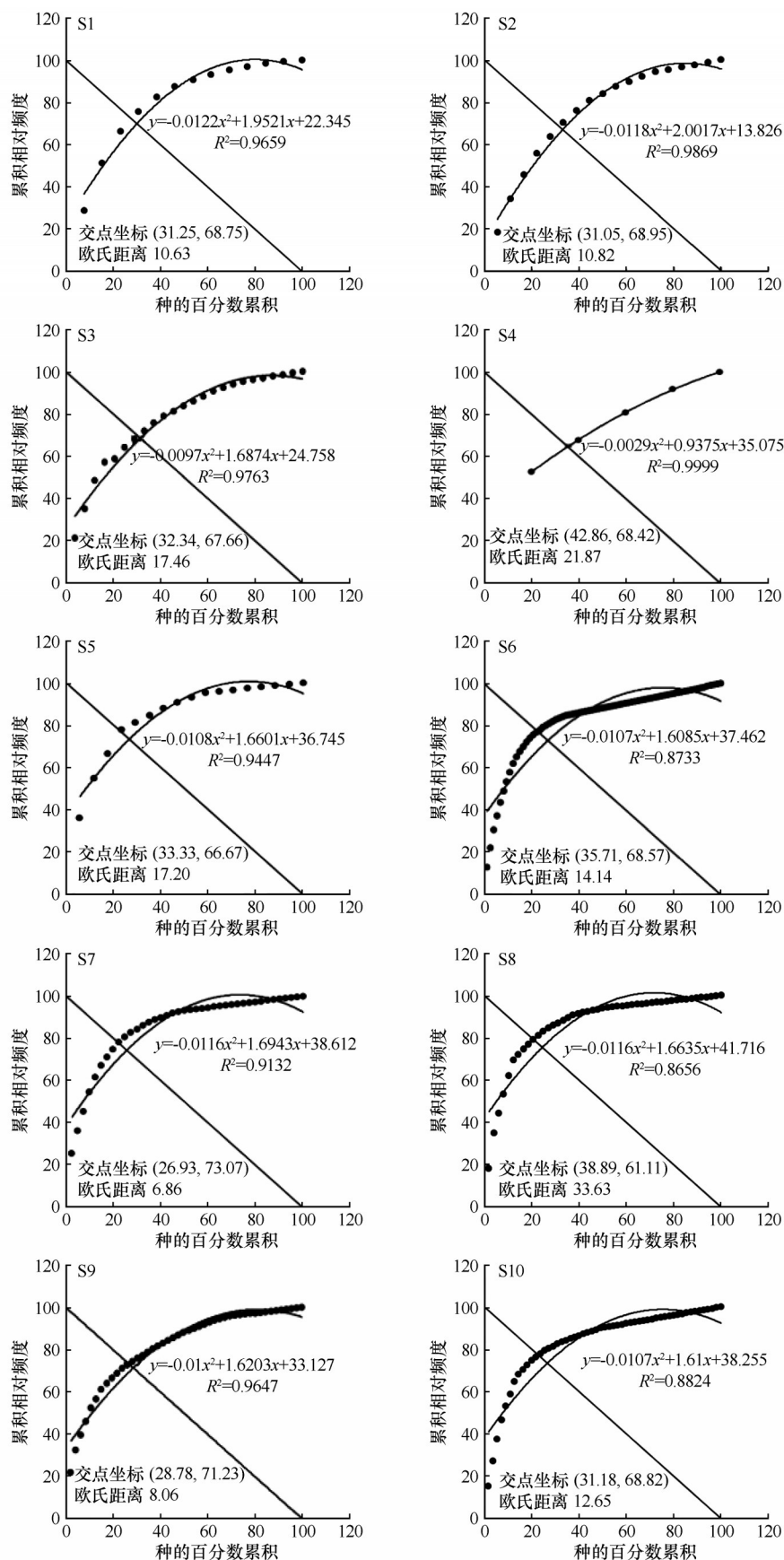


图2 宁夏森林群落稳定性模拟曲线

Fig.2 Godron stability simulation curve in forest community, Ningxia

的研究表明,固沙植物群落的稳定程度主要取决于群落内冗余的数量和结构。在本研究中,所有样地植物群落稳定性模拟曲线的 $R^2$ 值均较高,说明模型拟合效果好,能够可靠地反映群落稳定性。不同植物群落稳定性的差异与树种的生态策略、生长特性以及对环境变化的适应能力有关。S7青海云杉群落和S9云杉群落的高稳定性可能与云杉属植物的生态位宽度和竞争优势有关,云杉属植物通常具有较深的根系,能够更好地利用土壤水分和养分,同时其耐阴性使其在林冠下也能保持生长,这些特性使得云杉群落在面对环境变化时具有较强的抵抗力和恢复力<sup>[40]</sup>,成为森林生态系统的顶级群落<sup>[41]</sup>。此外,云杉林在碳储存和气候调节方面发挥着重要作用,从而增强了群落的稳定性<sup>[42]</sup>。相反,S8华北落叶松群落和S4侧柏群落的低稳定性可能与这些树种对环境变化的敏感性有关。华北落叶松和侧柏虽然具有一定的耐旱性,但在面对极端干旱和土壤贫瘠等环境压力时,其生长和繁殖可能受到限制,从而影响了群落的稳定性<sup>[43-44]</sup>。此外,这些树种可能更容易受到病虫害的影响,从而影响整个群落的稳定性<sup>[45]</sup>。群落稳定性的评估是生态学研究中的一个重要领域,它涉及到群落对环境变化的响应以及生态系统服务功能的维持。在干旱和半干旱地区,植物群落的稳定性尤其重要,因为它直接关系到生态系统对气候变化的适应能力<sup>[46]</sup>。因此,对宁夏森林样地植物群落稳定性的研究不仅有助于理解区域生态系统的动态变化,也为生态保护和恢复提供了科学依据。

本研究的结果支持了生态学中的“多样性-稳定性假说”,即物种多样性较高的生态系统在面对环境变化时表现出更强的抵抗力和恢复力<sup>[47]</sup>。Shannon-Wiener指数( $H$ )和Patrick丰富度指数( $R$ )与群落稳定性的显著正相关表明,物种多样性和丰富度的增加能够显著提高生态系统的稳定性。多样性的增加可以提高生态系统的冗余度,使得群落在面对环境压力时能够通过功能替代维持其稳定性<sup>[48]</sup>,强调了在生态恢复和保护中应优先考虑提高物种多样性,以增强生态系统的稳定性和抗干扰能力。

## 4 结论

本研究综合评估了宁夏森林生态系统的植物

多样性和群落稳定性,揭示了不同森林群落的物种组成、多样性和稳定性特征,为理解区域生态系统的动态变化和制定生态保护策略提供了科学依据。研究发现,宁夏森林群落的物种丰富度和多样性指数在不同样地间存在显著差异,草本层物种多样性较高,而乔木层较低。群落稳定性分析显示,青海云杉群落和云杉群落稳定性最高,而华北落叶松群落和侧柏群落稳定性最低。群落物种多样性和稳定性之间存在显著正相关关系。这些结果强调了在干旱和半干旱地区保护和恢复森林生态系统的重要性,以及在生态保护和森林资源管理中考虑地形、气候和土壤因素的综合作用的必要性。

## 参考文献:

- [1] Luo Y H, Cadotte M W, Burgess K S, et al. Greater than the sum of the parts: how the species composition in different forest strata influence ecosystem function[J]. *Ecology Letters*, 2019, 22: 1449-1461.
- [2] 米湘成,冯刚,张健,等.中国生物多样性科学研究进展评述[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(4): 384-398.
- [3] Hooper D U, Adair E C, Cardinale B J, et al. A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change[J]. *Nature*, 2012, 486: 105-108.
- [4] Liu X J, Trogisch S, He J S, et al. Tree species richness increases ecosystem carbon storage in subtropical forests[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2018, 285: 20181240.
- [5] Hua F, Bruijnzeel L A, Meli P, et al. The biodiversity and ecosystem service contributions and trade-offs of forest restoration approaches[J]. *Science*, 2022, 376: 839-844.
- [6] 韦惠兰,祁应军.森林生态系统服务功能价值评估与分析[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(2): 74-82.
- [7] 程积民,金晶炜,田瑛,等.宁夏森林植被及土壤碳密度分布特征[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(13): 109-117.
- [8] 尚占环,姚爱兴,辛明.宁夏香山荒漠草原区生物多样性与环境特征研究[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(3): 28-31.
- [9] 郝智如,张克斌.宁夏盐池人工封育区植物群落结构及多样性[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(3): 377-384.
- [10] 施晨阳,蒋天雨,赖文峰,等.宁夏六盘山毛榛群落灌木层优势种的生态位和种间联结分析[J]. *植物资源与环境学报*, 2022, 31(4): 85-94.
- [11] 苏文瑞,田佳,杨泽康,等.基于GEE和LandTrendr的宁夏“三山”森林干扰监测[J]. *中国水土保持科学*, 2022, 20(6): 41-49.
- [12] 刘延惠,王彦辉,于澎涛,等.六盘山主要植被类型的生物量及其分配[J]. *林业科学研究*, 2011, 24(4): 443-452.
- [13] 段河,张煜星,张建波.贺兰山西麓植被与植物多样性研究[J]. *林业资源管理*, 2019, 1: 146-152.

- [14] 金山.宁夏贺兰山国家级自然保护区植物多样性及其保护研究[D].北京:北京林业大学,2009.
- [15] 金山,胡天华,赵春玲,等.宁夏贺兰山自然保护区植物优先保护级别研究[J].北京林业大学学报,2010,32(2):113-117.
- [16] 李尚玉,刘超,徐雪蕾,等.宁夏罗山国家级自然保护区主要森林类型群落结构特征与植物物种多样性[J].农业科学研究,2023,44(4):81-86.
- [17] 张晋宁,章英才,张强.宁夏六盘山自然保护区森林群落物种多样性[J].宁夏农学院学报,2001,1:31-33.
- [18] 何小琴,吴小舟,王刚.六盘山自然保护区森林群落物种多样性研究[J].甘肃林业科技,2013,2:7-10.
- [19] 宁夏回族自治区统计局.宁夏统计年鉴 2023[M].北京:中国统计出版社,2023.
- [20] 韩高玲,霍建强,赵燕翘,等.鄂尔多斯高原砒砂岩地区草本物种组成及多样性[J].中国沙漠,2023,43(3):243-251.
- [21] 雷军,程新平,薛春,等.黑河流域中游北部荒漠区植物群落特征与稳定性[J].中国沙漠,2024,44(6):187-194.
- [22] 张金屯.数量生态学[M].北京:科学出版社,2018.
- [23] 司瑞,刘冰,赵文智,等.黑河下游尾间区植物群落物种多样性与稳定性格局[J].中国沙漠,2021,41(3):174-184.
- [24] Godron M, Daget P, Poissonet J, et al. Some aspects of heterogeneity in grasslands of Cantal [J]. *Statistical Ecology*, 1972, 3: 397-415.
- [25] 郑元润.森林群落稳定性研究方法初探[J].林业科学,2000,(5):28-32.
- [26] 张志永,时忠杰,张晓,等.浑善达克沙地不同微地形的土壤物理性质和草本群落分布及其相关性分析[J].植物资源与环境学报,2017(1):69-76.
- [27] 李钢铁,姚云峰,左合君.浑善达克沙地桑根达来地区榆树疏林的分布与立地因子的关系的研究[J].世界林业研究,2008,21:82-86.
- [28] 李红丽.浑善达克沙地沙漠化过程及其植被恢复的基础研究:以正蓝旗为例[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2003.
- [29] Bai Y F, Wu J G, Xing Q, et al. Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia Plateau [J]. *Ecology*, 2008, 89(8):2140-2153.
- [30] 詹瑾,李玉霖,韩丹,等.放牧对浑善达克沙地丘间低地植被群落及土壤的影响[J].中国沙漠,2019,39(6):187-194.
- [31] 王璇,陈国科,郭柯,等.1:100万中国植被图森林和灌丛群系类型的补充资料[J].生物多样性,2019,27(10):1138-1142.
- [32] 李新荣,何明珠,贾荣亮.黑河中游荒漠区植物多样性分布对土壤水分变化的响应[J].地球科学进展,2008(7):685-691.
- [33] 宋创业,郭柯,刘高焕.浑善达克沙地植物群落物种多样性与土壤因子的关系[J].生态学杂志,2008,27(1):10-15.
- [34] 彭羽,蒋高明,李永庚,等.浑善达克沙地榆树疏林自然保护区核心区设计的初步研究[J].植物生态学报,2005,29(5):775-780.
- [35] 赵文智,刘鸽.荒漠区植被对地下水埋深响应研究进展[J].生态学报,2006,26(8):2702-2708.
- [36] 姚雪玲,李龙,王锋,等.放牧方式对浑善达克沙地榆树疏林退化的影响[J].生态学报,2020,40(5):163-171.
- [37] 元志辉,包刚,银山,等.2000-2014年浑善达克沙地植被覆盖变化研究[J].草业学报,2016,25(1):33-46.
- [38] Hillebrand H, Blenckner M. Species richness and body size in marine plankton ecosystems [J]. *Ecology Letters*, 2002, 5(6): 731-738.
- [39] 曹成有,朱丽辉,蒋德明,等.固沙植物群落稳定性机制的探讨[J].中国沙漠,2004,24(4):83-88.
- [40] Chapin F S III, Autumn B, Pugnaire F. Evolution of suites of traits in response to environmental stress [J]. *American Naturalist*, 1993, 142(4):S78-S92.
- [41] 赵哈林,赵学勇.沙漠化的生物过程及退化植被的恢复机理[M].北京:科学出版社,2007.
- [42] 邢存旺.黄羊滩人工固沙林生态稳定性的研究[D].河北保定:河北农业大学,2013.
- [43] 吕光辉,杜昕,杨建军,等.阜康绿洲-荒漠交错带荒漠植被群落稳定性[J].干旱区地理,2007,30(5):660-664.
- [44] Davis M B, Shaw R G. Range shifts and adaptive responses to Quaternary climate change [J]. *Science*, 2001, 292(5517): 673-679.
- [45] Jump A S, Penuelas J. Running to stand still: adaptation and the response of plants to rapid climate change [J]. *Ecology Letters*, 2005, 8(9):1010-1020.
- [46] Suding K N, Lavorel S, Chapin F S III. Scaling environmental change through the community-level: a trait-based response-and-effect framework for plants [J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(4):1641-1649.
- [47] Hooper D U, Chapin F S III, Ewel J J, et al. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge [J]. *Ecological Monographs*, 2005, 75(1):3-35.
- [48] Loreau M, Naeem S, Inchausti P, et al. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges [J]. *Science*, 2001, 294(5543):804-808.



## Plant diversity and community stability in forest ecosystems of Ningxia, China

Zhang Weihong<sup>1</sup>, Ma Juan<sup>1</sup>, Zhao Ruizhi<sup>1</sup>, Zhou Wei<sup>1</sup>, Zhao Xinyi<sup>1</sup>, Pan Yanxia<sup>2</sup>

(1. Ningxia Environmental Monitoring Center, Yinchuan 750002, China; 2. Shapotou Desert Research and Experiment Station / National Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** This study systematically analyzed the plant diversity and community stability of forest ecosystems in the Ningxia Hui Autonomous Region based on survey data from 10 forest ecosystem plots. A total of 202 plant species were recorded, belonging to 54 families and 124 genera, including 23 species in the arboreal layer, 31 species in the shrub layer, and 148 species in the herbaceous layer. By calculating the Sprenson similarity coefficient, importance value index, diversity index, and applying the Godron stability measurement method, the species composition differences, species importance, diversity levels, and stability characteristics of different forest communities were assessed. The study found significant differences in species richness and diversity indices among forest communities in Ningxia, with the richness index ranging from a minimum of 5 to a maximum of 72, and the diversity index (Shannon-Wiener index) ranging from a minimum of 1.33 to a maximum of 3.42. The community stability analysis revealed that the *Picea crassifolia* community had the highest stability index (Godron stability measurement), closely approaching the stability point (20, 80), while the *Larix principis-rupprechtii* community had the lowest stability index, deviating significantly from the stability point. A significant positive correlation was found between species diversity and community stability. The results of this study provide scientific guidance and decision-making support for the management of forest ecosystems in Ningxia and similar arid regions, emphasizing the importance of protecting biodiversity and maintaining ecosystem stability.

**Key words:** Ningxia; forest ecosystem; plant diversity; community stability; ecological management