

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.037; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.037.

张文瑶, 程盈盈, 刘颖, 等. 黄土高原造林树种多样性及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):411-417, 426.

Zhang Wen Yao, Cheng Yingying, Liu Ying, et al. Diversity of afforestation tree species and its influencing factors in Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):411-417, 426.

黄土高原造林树种多样性及其影响因素

张文瑶^{1,2,3}, 程盈盈⁴, 刘颖^{1,2,3}, 杜盛^{1,2,5}, 李国庆^{1,2,5}

(1. 中国科学院 教育部 水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部

水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 西北农林科技大学

资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100; 5. 西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 明晰黄土高原造林树种多样性整体特征, 并探究影响丰富度分布的关键因素, 为该地区树种选择和生态建设提供理论依据。[方法] 基于 2000 篇国内外文献构建黄土高原造林树种名录。随后基于县域尺度上植物标本分布数据, 运用 ArcGIS 绘制造林树种丰富度分布图。采用分类回归树(CART)方法研究影响造林树种丰富度的关键因素。[结果] 黄土高原地区造林树种共计 361 种, 隶属于 58 科、141 属, 蔷薇科、豆科和杨柳科是优势科(共 123 种)。乔木(194 种)与灌木(167 种)树种数量相当。本土种数量(261 种)大于外来种(100 种)。在用途上, 生态林树种(207 种)数量最多, 远超经济林树种(41)、用材林树种(9)和园林树种(24)。黄土高原的造林树种多样性呈现从东南部向西北部逐渐递减的趋势。森林用地比例和粮食产量是影响该地区造林树种丰富度的两个关键因素。[结论] 黄土高原多年造林实践筛选出多样化的树种, 生态建设中树种多样性与绿色空间、粮食空间存在权衡关系。

关键词: 物种多样性格局; 造林树种; 黄土高原

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0411-07

Diversity of afforestation tree species and its influencing factors in Loess Plateau

Zhang Wen Yao^{1,2,3}, Cheng Yingying⁴, Liu Ying^{1,2,3}, Du Sheng^{1,2,5}, Li Guoqing^{1,2,5}

(1. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese

Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of

Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of

Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. College of

Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] To clarify the overall characteristics of afforestation tree species diversity in the Loess Plateau and explore the key factors influencing richness distribution, so as to provide a theoretical basis for tree species selection and ecological construction in the region. [Methods] A comprehensive list of afforestation tree species for the Loess Plateau was compiled through systematic analysis of 2 000 domestic and international publications. Subsequently, species richness distribution patterns were mapped at the county scale using ArcGIS, based on spatially explicit plant specimen occurrence data. Finally, the Classification and Regression Tree (CART) method was employed to identify the key drivers influencing afforestation tree species richness across the region. [Results] The Loess Plateau region hosted a total of 361 afforestation tree species, belonging to 58 families and 141 genera, with Rosaceae, Fabaceae, and Salicaceae identified as the dominant families (123 species total). Tree species (194) and shrub species (167) exhibited comparable representation. Native species

收稿日期: 2025-03-20

修回日期: 2025-03-30

接受日期: 2025-04-20

资助项目: 国家自然科学基金(31971488); 国家重点研发计划项目(2017YFC0504601)

第一作者: 张文瑶(2001—), 女, 河北邢台人, 硕士研究生, 研究方向为生物多样性研究。E-mail: 2945123171@qq.com

通信作者: 李国庆(1983—), 男, 江苏连云港人, 博士, 副研究员, 主要从事植被恢复与 GIS 模拟研究。E-mail: liguoqing@nwsuaf.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

(261) significantly outnumbered introduced species (100). In terms of functional classification, ecological forest species (207) dominated in quantity, far exceeding economic forest species (41), timber species (9), and ornamental species (24). Afforestation tree species diversity on the Loess Plateau showed a decreasing trend from the southeast to the northwest. Forest land proportion and grain production emerged as the two key determinants of species richness. [Conclusion] Long-term afforestation practices on the Loess Plateau have selected diverse tree species, revealing a trade-off between species diversity in ecological restoration and the allocation of green space versus agricultural land.

Keywords: species diversity patterns; afforestation tree species; Loess Plateau

黄土高原是中华文明的重要发祥地,自然条件复杂,不仅是重要的地理位置还是重要的经济区域。但其长期受到气候变化和人类活动影响,植被退化严重,土壤侵蚀、水土流失加剧,生态环境十分脆弱^[1]。因此,该区域是中国水土保持和生态恢复建设的重要区域,也是退耕还林、三北防护林等重大生态工程的核心地带^[2]。大量研究表明,随着一系列生态环境保护措施的实施,黄土高原土壤侵蚀得到有效遏制、森林覆盖率增加、生态环境和生态服务功能都得到极大的改善^[3-4]。然而,黄土高原仍面临人工林生态系统质量下降、水资源短缺和生态修复工程质量亟待提升等挑战^[5-6]。2021年“黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要”的颁布,强调了该区域生态环境可持续性和高质量发展的重要性。

退耕还林作为生态恢复工程的核心策略^[7],在其推进过程中,围绕“植树造林或种草绿化”的议题引发了广泛而深入的探讨。主张种草的一方认为,草本植物凭借其迅速的生长能力,能够有效且迅速地覆盖地表,显著降低水土流失,加之对水资源的需求相对较低,因此在干旱地区具有显著优势。相反,支持植树造林的观点则着重指出,乔木与灌木不仅生态功能更为强大,而且能够长期稳定地优化生态环境,尤其适合于湿润区域。值得注意的是,过去退耕还林政策中的补贴机制更倾向于鼓励造林而非种草,这一导向极大地激励了政府与农户自2000年起在黄土高原这一广袤地域内广泛开展植树造林活动。

造林树种的选择不仅构成了整个造林工程的首要步骤,更是关乎全局成效的关键所在,其重要性不言而喻。合适的树种选择能显著提高造林成活率,促进生态系统的稳定和可持续发展,因此造林树种是实现研究区可持续发展目标的重要资源^[8]。学术界针对造林树种开展了广泛的引种试验和生理生态试验。这些研究涵盖了树种的适应性^[9]、生长特性^[10]和生态效益等^[11]多个方面,为科学选择造林树种提供了理论和实践基础。然而,经过数十年的局地造林实践,黄土高原区域层面的造林物种库仍不清晰,

这种树种多样性反映了区域内可供选择树种资源的丰富程度。因此,全面梳理和总结黄土高原造林物种库的大小与树种多样性的历史成就尤为迫切。

鉴于退耕还林工程是由政府引领的重大生态举措,且县域被设定为实施造林活动的最基本行政管理单元,本研究致力于通过全面搜集并系统整理相关文献资料,深入县域层面,细致剖析黄土高原地区造林树种的多样性状况、空间分布特性及其背后的影响因素。具体目标包括:(1)构建黄土高原造林树种名录数据库;(2)绘制黄土高原造林树种多样性的分布格局;(3)分析影响黄土高原造林树种多样性分布的关键因素。通过整合黄土高原造林树种多样性的数据资源,实现跨地区的造林树种选择成果共享,有助于科学选择造林树种、配置与优化,提高造林成效,为未来黄土高原生态恢复政策的制定和发展提供参考,推动该区域生态环境质量的持续提升和高质量发展。

1 材料和方法

1.1 研究概况

黄土高原位于中国西北部(33°41'—41°16'N, 100°52'—114°33'E),总面积达64万km²,涵盖青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南七省区,连接黄河流域上下游。海拔为800~3 000 m。黄土高原兼具季风与非季风、半湿润与半干旱的气候特征,是典型的大陆季风气候区^[12]。冬季寒冷干燥,夏季温暖湿润,年平均气温为3.6~14.3℃。降水年际变化大,季节分配不均,东南部降水多于西北部,年降水量为200~700 mm。超过65%的年降水量集中在7—9月,且多为暴雨,这加剧了该地区的水土流失问题。植被分布上,黄土高原从东南向西北依次呈现森林、草原至荒漠的过渡特征。

1.2 造林物种名录与多样性组成调查方法

课题组以“黄土高原”与“造林树种”为关键词,在中国知网CNKI和Web of Science等平台检索并筛选了2 000篇相关文献,提取其中的造林树种数据。结合中国数字植物标本馆(CVH)和植物智(iPlant)等权威

平台补充完善造林树种基本信息,共获取 6 622 条有效记录。在此过程中,我们主要以中国生物物种名录 2 024 植物界(<http://sp2000.org.cn/download>)为准,同时参考了《中国树木志》《中国植物志》以及《黄土高原植物志》等权威著作补充校对树种中文名、拉丁名、科、属等关键信息,编制黄土高原造林树种名录。

依托于已构建的造林物种名录,课题组开展了造林树种多样性的统计分析工作。以植物科为单位统计,划分乔木与灌木生活型。并基于生态学定义将黄土高原地区自然存在的树种分为本土树种,而将通过自然或人为途径引入且在该地区无自然分布的树种则分为外来树种^[13]。同时,根据主要用途将树种划分为生态林、经济林、用材林和园林 4 类。

1.3 造林树种多样分布格局制图方法

物种丰富度是最简单、最直观的物种多样性测度方法,对其格局的研究也广泛应用于大尺度格局上生物多样性分布规律的研究^[14]。以黄土高原 341 个县为单位,统计县域内造林树种丰富度。造林树种分布数据标本记录主要来源于中国数字植物标本馆(CVH, <http://www.cvh.ac.cn/>)和中国国家标本资源平台(NSII, <http://www.nass.org.cn/>)。依据每个物种的精确坐标信息将物种与县区进行关联,同一县区内相同物种不重复统计,各县区拥有的总物种数作为该县域的物种丰富度,并基于 ArcGIS 软件将各区县的物种丰富度数据可视化,绘制出黄土高原造林树种的多样性分布图。

1.4 造林树种多样性影响因素分析方法

为了探索影响造林树种多样性的因素,本研究主要检验 2 种假说:气候控制假说和社会经济控制假说。气候因素从全球气候数据网站(<http://www.worldclim.org/>)获取,包括:年平均气温(AMT)、年生生物温度(ABT)、年温差(ART)、最热月最高气温(MTWM)、最冷月最低气温(MTCM)、年降水量(AP)、最干月降水量(PDM)、最湿月降水量(PWM)、降水季节性(PSD)、潜在蒸散率(PER)、寒冷指数(CI)、温暖指数(WI)和湿度指数(HI)。社会经济数据包括人口密度(POP)、粮食产量(GP)、国内生产总值(GDP)、人类足迹(HF)、森林用地比例(FV)和建筑用地比例(CON),来源于社会经济数据应用中心(<http://sedac.ciesin.columbia.edu/wildareas/>)和各省市统计年鉴以及中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。

采用分类与回归树(CART)方法,深入探究造林树种多样性与环境因素的内在联系。以物种丰富度为响应变量,气候与社会经济因子为预测变量,构建

回归树模型。并通过交叉验证策略剪枝以优化模型^[15]。CART 方法通过 R 4.4.0 版本的 rpart 包实现。使用 ArcGIS 软件中的核密度分析工具进一步解释和分析不同环境变量对造林树种丰富度空间分布特征的影响。基于 CART 结果将黄土高原县域划分为不同空间,分别对不同空间的县区以其造林树种丰富度为属性字段进行核密度分析,之后利用加权总和工具进行加权,最终得到加权核密度分布图^[16]。

2 结果与分析

2.1 黄土高原造林树种多样性结构特征

统计结果显示共记录黄土高原造林树种 58 科 141 属 361 种。其中乔木树种 38 科 77 属 194 种,灌木树种 36 科 81 属 167 种。含 30 个种以上的是蔷薇科(Rosaceae)、豆科(Fabaceae)和杨柳科(Salicaceae),共 123 种,占总物种数的 34.07%;含 1~30 种的有松科(Pinaceae)、木樨科(Oleaceae)、无患子科(Sapindaceae)、柏科(Cupressaceae)、榆科(Ulmaceae)、怪柳科(Tamaricaceae)、桦木科(Betulaceae)和壳斗科(Fagaceae)8 科 106 种;这两部分共 11 科的物种数占比达 63.43%,构成黄土高原造林树种的主体部分(图 1)。这 11 科中共有乔木树种 138 种,占乔木总物种数的 71.13%。有灌木 91 种,占灌木总物种数的 54.49%。乔木树种中常绿乔木 24 种,落叶乔木 170 种。蔷薇科和杨柳科物种树木最多,其次为松科,以上三科共 74 种,占乔木总物种数 38.14%。灌木树种中常绿灌木 14 种,落叶灌木 153 种;蔷薇科最多,为 29 种,其次为豆科 26 种,然后为木樨科 11 种,这三科占灌木总物种数的 39.53%。

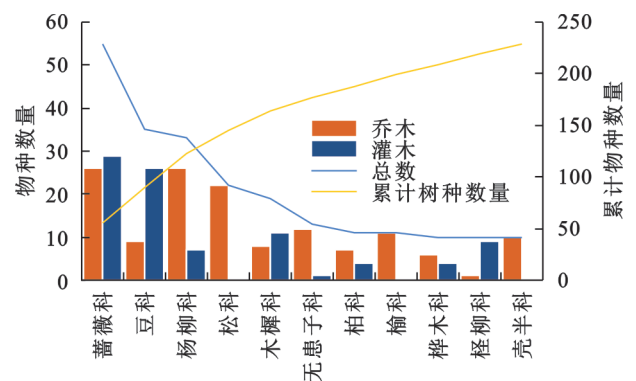


图 1 黄土高原造林树种中含 10 种及以上物种的科
Fig. 1 Families with 10 or more afforestation tree species on the Loess Plateau

2.2 黄土高原造林树种多样性功能特征

造林树种中本土种 261 种,外来种 100 种,外来种占比 27.7%。黄土高原造林树种中入侵植物有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、爆竹柳(*Salix fragilis*)和紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)3 种。通过对外来种的来

源地进行统计分析,并将其归类至全球七大洲之中,结果显示外来种 82% 都来自亚洲,来自亚洲的物种中 64 种是中国有自然分布而黄土高原无自然分布的树种。外来种的 67% 为乔木,乔木树种外来种占乔木总物种数的 34.54%。灌木树种外来种占灌木总物种数的 19.76%,相比乔木,黄土高原地区的灌木造林树种基本为本土种,引种较少(表 1)。这些数据表明,黄土高原的造林绿化工程主要以本土树种为核心,而在引种方面,则倾向于选择地理邻近区域的树

种,这有助于提高造林的成功率和生态适应性。

按照树种的主要用途来看,黄土高原造林树种主要为生态营林树种,占比为 57.34%。这一比例在乔木树种中更是高达 61.86%,显示出黄土高原在造林树种选择上对生态功能的重视。在乔木树种中,除了生态营林树种外,经济树种也占乔木树种的 21.13%。而在灌木树种中,生态营林树种以 87 种的数量成为最主要的类型,园林树种以 51 种的数量位居其次,分别占灌木树种总数的 52.1% 和 30.54%(表 1)。

表 1 黄土高原造林树种物种特征分类

Table 1 Classification of characteristics of afforestation tree species on the Loess Plateau

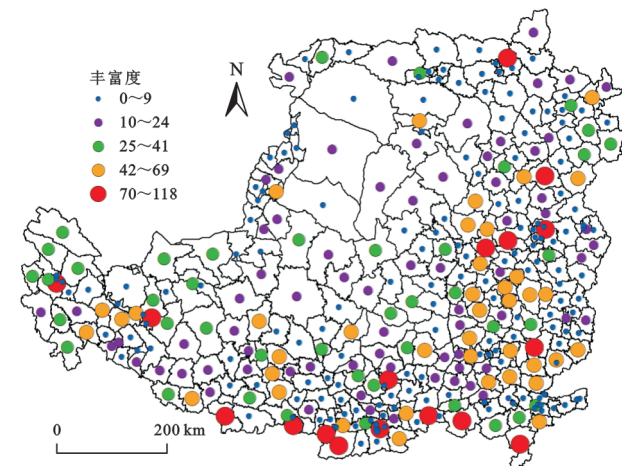
物种特征 分类	树种来源				树种功能				
	本土	外来	总计	外来种占比/%	生态林	经济林	用材林	园林树种	总计
乔木	127	67	194	34.54	120	41	9	24	194
灌木	134	33	167	19.76	87	28	1	51	167
总计	261	100	361	27.70	207	69	10	75	361
灌木占比/%	51.34	33.00	46.26	—	42.03	40.58	10.00	68.00	46.26

2.3 黄土高原造林树种多样性分布格局

造林树种丰富度在黄土高原的分布不均匀,呈现出显著的差异(图 2)。从整体上看,黄土高原造林树种丰富度呈现从东南至西北逐渐降低的趋势。山西省和陕西省南部也就是秦岭—太行山一带具有较高的丰富度,相比之下内蒙古地区丰富度最低。丰富度在黄土高原地区的各行政县内也并不是连续分布的,呈现出明显的地域集中性。据统计,陕西省宝鸡市眉县的造林树种丰富度最高,为 118 种,占黄土高原总物种数的 32.7%;其次为甘肃省天水市的秦州区(112 种)和山西省太原市的迎泽区(97 种)。黄土高原地区丰富度等级最高(70~118 种)的县区有 17 个,其中 12 个为市辖区和县级市,即丰富度等级较高的区域大多分布在市区。

2.4 黄土高原造林树种多样性影响因素

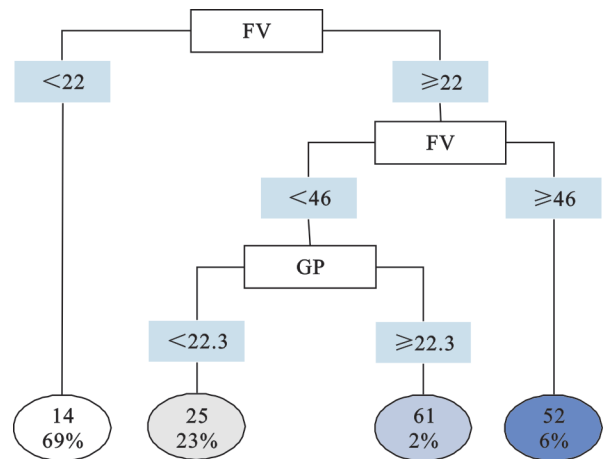
CART 分析结果(图 3)表明,影响黄土高原造林树种多样性的主要因素为森林用地比例(FV)和粮食产量(GP)。在前两次分叉中,森林用地比例贡献最大,第三次分叉中,粮食产量起到了关键的作用,最终划分为高森林覆盖区($FV \geq 46\%$)、中森林覆盖区($22\% \leq FV < 46\%$)和低森林覆盖区($FV < 22\%$),中森林覆盖区又分为农业发达区($GP \geq 22.3$ 万 t)和农业落后区($GP < 22.3$ 万 t)。高森林覆盖区造林树种平均约 52 种,在低森林覆盖区 14 种,农业发达区造林树种 61 种,而农业落后区造林树种 25 种。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图未做修改。

图 2 黄土高原造林树种丰富度空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution map of afforestation tree species richness on the Loess Plateau



注:FV为森林用地比例(%);GP为粮食产量(万吨)。

图 3 黄土高原造林树种丰富度影响因素分类回归树结果

Fig. 3 Classification and regression tree (CART) results for factors influencing afforestation tree species richness on the Loess Plateau

利用森林用地比例和粮食产量作为环境空间变量分别进行核密度分析,然后加权得到加权核密度分布图(图 4),由图可知,随着森林用地比例的增加

粮食产量逐渐降低,表明了森林和农业用地之间存在竞争关系。核密度值呈现随森林用地比例的增加而增大的整体趋势,也就是较高的森林用地比例具有较高的丰富度。在中等森林覆盖区,农业发达区表现出较高的丰富度;在低森林覆盖区土地利用间的竞争更加激烈,核密度值随着粮食产量的增加呈现减小的趋势。以上表明高的森林用地比例和高的粮食产量将导致高的造林树种多样性。

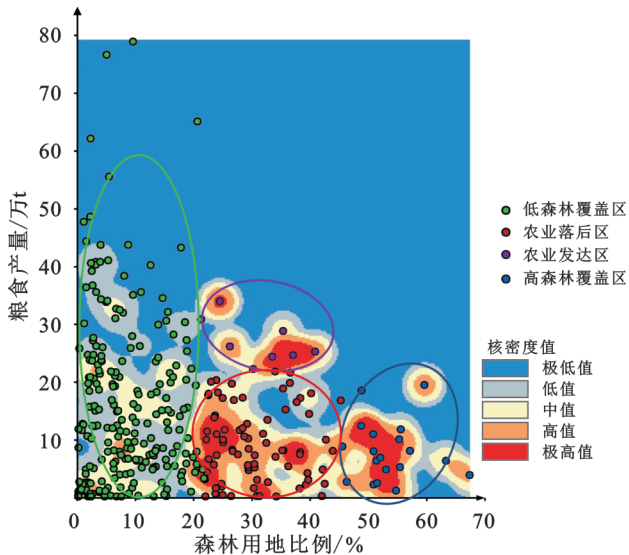


图 4 黄土高原造林树种丰富度在绿色空间和粮食空间中的加权核密度分布图

Fig. 4 Weighted kernel density distribution of afforestation tree species richness on the Loess Plateau within green space and agricultural land

3 讨论

3.1 黄土高原造林树种多样性结构和功能特征

黄土高原造林树种的物种组成具有多样化特征,并呈现出显著的生态适应性与其功能协同特征。本研究共记录黄土高原造林树种 361 种,其中灌木 167 种,占据 46.3%,与乔木树种数量几乎持平,这与黄土高原地区湿润和干旱生境面积比例相契合,表明灌木在该地区造林中具有重要地位,尤其能在干旱地区发挥重要作用^[17]。从科属分布来看,树种组合呈现出集中趋势,蔷薇科、豆科和杨柳科的树种在数量上位居前三,并占总物种数的 34.07%。这些树种在全球广泛分布,具有抗旱、抗寒的生态特性,另外这些树种采用种子繁殖,也能通过无性繁殖进行扩散^[18-20]。这些树种的特点优势能支持其在黄土高原复杂恶劣的环境下生存,因此常作为生态植被修复的主要树种。除此之外,其较高的经济价值也使其在农林业、园艺、植被建设等方面具有重要作用。

在树种的功能分类中,生活型与功能用途分化明确。生态营林树种在黄土高原占主导,这反映了该地

区长期以来在植被恢复方面取得的成效。乔木与灌木功能侧重不同,乔木广泛用于生态营林,而灌木则兼具生态与园林绿化。这种分布格局与黄土高原特有的自然环境和生态发展需求有关。作为中国重要的生态屏障,其造林树种的选择不仅要考虑生态修复和保护的需要,也要兼顾经济收益和社会效益。生态营林树种因其在水土保持和防风固沙等方面的重要作用而成为首选。同时,经济树种有助于当地居民增收,而园林树种则在美化环境、提升景观效果方面发挥作用。此外,本土种主导性较强,本土种占比 72.3%,凸显了黄土高原造林实践对本地物种生态适应性的依赖。灌木中外来树种少于乔木,表明了黄土高原地区灌木引种程度较低。可能是因早期林业活动偏好乔木,在一定程度上限制了灌木的更广泛应用^[21]。

3.2 黄土高原造林树种多样性空间分布影响因素

我们绘制了黄土高原造林树种多样性分布图,直观展示树种分布,并提供深入评估的支持。图表显示各县区物种丰富度,指导未来造林规划和生态恢复。造林树种丰富度从东南向西北递减,与种子植物多样性趋势一致^[22]。这一趋势与黄土高原的气候条件、土壤类型以及历史上的植被建设活动密切相关。东南地区由于气候条件较为湿润、土壤肥沃,更适宜多种树种的生长,而西北地区由于干旱少雨、土壤贫瘠,树种丰富度相对较低。基于 CART 分析,得知黄土高原造林树种整体丰富度分布的主要影响因素被确定为森林用地比例和粮食产量。这一发现支持了社会经济控制假说,与前人研究结果相呼应。例如李婷等^[23]的研究已指出影响黄土高原植被恢复成效最为显著的社会经济因素是农村劳动力和粮食总产量。

森林用地比例的高低直接关联到该地区的绿色空间和树种的生存空间,粮食产量反映了生产粮食所占据的空间。核密度分布图展示了在绿色空间和粮食空间共同影响下,黄土高原造林树种丰富度的空间分布模式。在高森林用地比例的区域丰富度较高。这一结论与前人的研究相吻合^[24],因为森林用地比例高的地区通常具备更丰富的栖息环境和生态位,为多种物种的生存提供了有利条件。此外,这些地区的气候地理条件优越,加之积极的林业政策和实践,共同促成了树种多样性的高度丰富。在中等森林用地比例的区域,农业发达区表现出更高的造林树种丰富度。这可能是因为经济发达、人类活动频繁的地区拥有更完善的生态保护措施和植被绿化建设。同时,这些地区也具备更完善的基础设施和技术支持,更有可能开展林木培育研究和实施集约化的林业管理。以往的研究也证实了人类活动和物种丰富地区之间

存在空间一致性^[25]。在低森林用地比例的区域,造林树种的生存空间相对有限,导致生态系统恢复与粮食生产在土地利用上产生竞争。这种竞争使得生态恢复的收益与维持粮食供应的成本之间形成了微妙的权衡。退耕还林政策就是这一权衡的典型体现^[26]。值得注意的是,在森林用地比例和粮食产量都较低的市区,生物多样性的丰富度却相对较高。这可能与城市生态系统的特殊性有关,因为城区通常会将更多的资源和注意力投入到城市绿化和生态环境建设中,从而提高造林树种的丰富度^[27]。

综上所述,森林用地比例、粮食产量与造林树种丰富度之间存在着复杂而微妙的关系。这种关系受到多种因素的影响,包括气候地理条件、土地利用模式以及林业政策等。为了更深入地理解这些关系,并为造林树种的选择提供科学依据,未来的研究应进一步探讨这些影响因素之间的相互作用机制,并考虑如何在实际操作中优化造林树种的选择策略。

3.3 研究不足与展望

研究中所构建的造林树种名录主要基于中文和英文文献和期刊文章,所使用的造林树种分布数据主要来源于现有的标本数据,这些资料为我们提供了宝贵的本土知识和研究成果。虽然这些数据是根据中国实际情况得到的,并已被证明是适用的。但这些数据的来源可能存在一定的局限性(如没有包括书籍等资料)。目前尚缺乏一个统一的权威名录或官方数据集来作为参考。文献记载和标本数据可能反映的造林树种落后于造林工程的具体实时实践。尽管如此,我们通过综合分析现有文献,力求提供一个尽可能全面的树种名录,并在此基础上展开进一步的研究。当前黄土高原造林树种物种名录和地理分布数据库公共平台建设远远落后于生态工程发展的需要。未来的研究需要更加广泛地整合来自不同渠道的数据资源。与国内外林业研究机构建立合作关系,以获取更全面的树种研究资料和实地调研数据,从而增强数据的实证基础。最终目标是构建一个能够动态更新的树种名录数据库,确保不断吸纳最新的研究成果与树种信息,从而维持名录的时效性和实用性。此举旨在为智慧林业的发展、林业决策的制定以及生态恢复工作提供坚实可靠的数据支撑。我们造林物种名录的整合,正是朝着这一宏伟目标迈出的关键一步。

生态恢复工程提高了黄土高原的生态环境,但也给黄土高原的社会经济发展带来了压力,且这种不平衡日益凸显^[28]。研究区这种环境和生产目标之间的权衡是退耕还林和其他森林恢复项目面临的主

要挑战^[29],由于不同功能土地利用权衡的潜在影响,水资源短缺、粮食产量的损失以及气候变化的潜在威胁等负面影响不可避免。充分发挥生态恢复工程的正效应是抵消负效应最直接的途径^[30]。高质量的生态工程建设是发挥正效应的重要手段,这就需要我们进行合理适当的规划,做好“树种多样性—粮食生产—森林覆盖度”之间的平衡关系,从而促进社会经济发展与生态环境协调发展,实现生态、经济以及社会效益的最大化。

黄土高原地区生态恢复工程必须在造林的生态、气候、社会和经济背景下考虑多种影响和潜在的权衡取舍,选择合适的造林树种。要实现黄土高原地区生态恢复与建设的高质量发展要求,未来的造林策略应在维护现有覆盖率的基础上调整种植结构,合理配置以提高树种多样性和生态系统的稳定性,尤其是在西北地区。未来的研究可以进一步探讨如何通过科学合理的林业管理和政策制定,来提高黄土高原造林树种的丰富度和生态系统的整体健康。考虑到全球气候变化对黄土高原地区的影响,未来的研究需要关注造林树种对气候变化的适应性,筛选适应性强的树种,以增强生态系统的韧性。

4 结论

(1) 研究共记录黄土高原造林树种 58 科 141 属 361 种,其中蔷薇科、豆科、杨柳科、松科的物种数量居前四,黄土高原造林树种选择重视生态功能且以本土种为主。

(2) 黄土高原造林树种丰富度从东南到西北逐渐递减。

(3) 黄土高原造林树种丰富度的主要限制因子为森林用地比例和粮食产量,揭示了在黄土高原地区生态建设工作中,树种多样性、粮食生产和森林覆盖度之间权衡的问题。

(4) 黄土高原动态更新的造林树种名录数据库的构建有利于促进智慧林业的蓬勃发展、优化林业决策的科学制定以及提升生态恢复工作的精准性与科学性。

参考文献(References):

- [1] Song Y Y, Xue D Q, Dai L H, et al. Land cover change and eco-environmental quality response of different geomorphic units on the Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Arid Land, 2020, 12(1): 29-43.
- [2] Hu Y F, Dao R N, Hu Y. Vegetation change and driving factors: contribution analysis in the Loess Plateau of China during 2000—2015[J]. Sustainability, 2019, 11

- (5):1320.
- [3] Chen S F, Zhang Q F, Chen Y N, et al. Vegetation change and eco-environmental quality evaluation in the Loess Plateau of China from 2000 to 2020[J]. *Remote Sensing*, 2023,15(2):424.
- [4] Liu Y, Kong C X, Zhang Y N, et al. Monitoring and evaluation of the effects of grain for green project on the Loess Plateau: a case study of Wuqi County in China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024,132:104006.
- [5] 刘颖,李国庆,杜盛.西北地区成过熟人工林质量衰退状况、原因与对策[J].*陆地生态系统与保护学报*,2022(5):55-61. Liu Y, Li G Q, Du S. The status, causes, and countermeasures for quality degradation of mature and over-mature plantations in northwest China [J]. *Terrestrial Ecosystem and Conservation*, 2022(5):55-61.
- [6] Wang K B, Deng L, Shangguan Z P, et al. Sustainability of eco-environment in semi-arid regions: lessons from the Chinese Loess Plateau[J]. *Environmental Science & Policy*, 2021,125:126-134.
- [7] Lamb D, Erskine P D, Parrotta J A. Restoration of degraded tropical forest landscapes [J]. *Science*, 2005, 310(5754):1628-1632.
- [8] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 1019-1022.
- [9] 陈恺茜,郝凡,袁衍琪,等.栓皮栎叶片解剖结构种群变异及其对环境因子的适应[J].*西北植物学报*,2024,44(5):772-781. Chen K X, Hao F, Yuan Y Q, et al. Population variation of leaf anatomical structure of *Quercus variabilis* and its adaptation to environmental factors[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024,44(5):772-781.
- [10] Wang J, Fu B J, Wang L X, et al. Water use characteristics of the common tree species in different plantation types in the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020,288:108020.
- [11] Xie H T, Tang Y, Yu M K, et al. The effects of afforestation tree species mixing on soil organic carbon stock, nutrients accumulation, and understory vegetation diversity on reclaimed coastal lands in Eastern China [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021,26:e01478.
- [12] Li S S, Hu J L, Shang W, et al. Spatiotemporal variation of snow cover days and influencing factors on the Loess Plateau during 2000—2019[J]. *Journal of Hydrology*, 2023,627:130419.
- [13] 刘艳杰,黄伟,杨强,等.近十年植物入侵生态学重要研究进展[J].*生物多样性*,2022,30(10):276-292. Liu Y J, Huang W, Yang Q, et al. Research advances of plant invasion ecology over the past 10 years[J]. *Biodiversity Science*, 2022,30(10):276-292.
- [14] 谢婷.中国木本植物物种丰富度格局的统计学机制研究[D].北京:华北电力大学,2019. Xie T. Research on statistical mechanism of species richness pattern for woody plants in China [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [15] Krzywinski M, Altman N. Classification and regression trees[J]. *Nature Methods*, 2017,14:757-758.
- [16] 杨若昕,张静晓,曹舒雯,等.基于加权核密度的高原高海拔地区路网络格局与景观生态风险时空变化[J].*长安大学学报:自然科学版*,2023,43(4):118-128. Yang R X, Zhang J X, Cao S W, et al. Temporal and spatial changes of road grid and landscape ecological risks in high altitude plateaus based on weighted kernel density[J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2023,43(4):118-128.
- [17] 李国庆,张晓芹,杜盛.基于随机森林模型的黄土高原林草界线模拟研究[J].*中国科技论文*,2017,12(15):1780-1784. Li G Q, Zhang X Q, Du S. Simulating the boundary of forest and grass on the Loess Plateau based on random forest model [J]. *China Sciencepaper*, 2017, 12(15): 1780-1784.
- [18] 邹东廷,王庆刚,罗奥,等.中国蔷薇科植物多样性格局及其资源植物保护现状[J].*植物生态学报*,2019,43(1):1-15. Zou D T, Wang Q G, Luo A, et al. Species richness patterns and resource plant conservation assessments of Rosaceae in China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019,43(1):1-15.
- [19] 熊义勤,汪自强.豆科植物的生物多样性和生态适应性[J].*自然杂志*,2018,40(1):64-70. Xiong Y Q, Wang Z Q. Biodiversity and ecoadaptability of Leguminosae [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2018, 40(1):64-70.
- [20] 宋海凤,张胜.杨柳科植物随环境变化的性别响应差异[J].*山地学报*,2017,35(5):645-652. Song H F, Zhang S. Sex-related responses to environmental changes in Salicaceae [J]. *Mountain Research*, 2017,35(5):645-652.
- [21] 刘世荣,杨予静,王晖.中国人工林经营发展战略与对策:从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营[J].*生态学报*,2018,38(1):1-10. Liu S R, Yang Y J, Wang H. Development strategy and management countermeasures of planted forests in China: transforming from timber-centered single objective management towards multi-purpose management for enhancing quality and benefits of ecosystem services [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,38(1):1-10.