

甘肃木本被子植物花色特征及垂直分布格局

Floral Color Characteristics and Vertical Distribution Pattern of Woody Angiosperms in Gansu Province

苏龙丽 刘晓娟* 张晓玮

SU Longli, LIU Xiaojuan*, ZHANG Xiaowei

摘要

为探明甘肃省木本被子植物花色分布特征与演化驱动机制, 基于文献资料系统核定该区域 1 273 种木本被子植物资源, 统计其花色与海拔分布数据, 通过卡方检验、方差分析等方法, 解析花色组成及不同生活型的花色分异规律。结果表明, 研究共获得 1 273 条花色信息, 花色分为六大类, 其中黄色系占比最大 (35.19%), 蓝色系占比最小 (1.41%); 不同生活型花色组成差异极显著, 黄色系在乔木、灌木、木质藤本中均占优势, 且在木质藤本中占比最大; 甘肃木本被子植物分布于 550~4 750 m 海拔区间, 以黄色系花为主, 花色分布随海拔梯度变化受地理环境因子调控。系统发育分析显示, 白色、红色、黄色等优势花色具备显著系统发育保守性, 主要受遗传背景约束; 绿色、紫色、蓝色等特殊花色无明显系统发育信号, 演化过程主要由局域环境选择驱动。

Abstract

To explore the distribution characteristics and evolutionary driving mechanisms of flower colors of woody angiosperms in Gansu Province, this study identified 1 273 species of woody angiosperms based on literature data, and collected their information on flower colors and altitudinal distribution. Chi-square test and variance analysis were adopted to analyze flower color composition and its differentiation across different life forms. A total of 1 273 flower color records were obtained and classified into six categories. The yellow flower group accounted for the largest proportion (35.19%), while the blue flower group had the lowest proportion (1.41%). Flower color composition differed significantly among life forms. Yellow flowers were dominant in arbors, shrubs and woody vines, with the highest proportion found in woody vines. These plants were distributed at altitudes from 550 m to 4750 m, and yellow flowers prevailed across all altitudinal zones. Geographical environmental factors regulated flower color distribution along the altitudinal gradient. Phylogenetic analysis revealed that dominant flower colors including white, red and yellow, presented strong phylogenetic conservatism and were mainly constrained by genetic background. By contrast, special flower colors such as green, purple and blue showed no obvious phylogenetic signals, and their evolution was primarily driven by local environmental selection.

文章亮点

1) 创新开展甘肃木本被子植物花色系统研究, 构建“组成-分布-环境-进化”四位一体研究范式, 丰富了区域相关研究。2) 阐明不同花色演化驱动机制, 为山地植物花色适应研究提供典型案例。

关键词

木本被子植物; 花色; 生活型; 地理环境因子; 垂直分布格局; 系统发育信号

Keywords

Woody angiosperms; Flower color; Life form; Geographical environmental factors; Vertical distribution pattern; Phylogenetic signal

收稿日期: 2026-03-04

修回日期: 2026-04-03

花色是花最显性的特征之一^[1], 在吸引传粉者、提高授粉成功率方面发挥关键作用^[2], 也蕴含着植物对环境因子的生态适应性及进化信息。在全球生物多样性热点区域及生态过渡带, 植物花色的地理分布与变异格局常与复杂的环境梯度, 如海拔等密切相关^[3], 为理解植物区系的形成机制与适应策略提供了独特窗口。木本被子植物作为陆地生态系统的骨架组分, 其花色特征的组成与分布格局承载着物种自身的进化策略, 也反映了区域生态环境的长期塑造作用^[4]。系统发育历史决定了物种花色的潜在演化范围与保守性特征^[3], 不同生活型植物在资源分配与适应策略上的差异, 进一步塑造了花色表型的分化方向^[1]。同时, 花色的演化与分布也深受温度、降水、光照强度、海拔等非生物环境因子的强烈筛选^[5], 生物因子和非生物因子的共同作用, 最终导致植物花色多样的演化格局与空间分布规律。而现有研究对西北地区, 尤其是甘肃省内木本被子植物花色多样性、空间分布及演化驱动机制仍缺乏系统探究。

本文通过卡方检验、方差分析、系统发育信号检测, 探究甘肃省木本被子植物六大色系的组成占比与整体分布特征、不同生活型的花色分化规律、不同海拔区间花色分布特征、关键地理环境因子对花色分布的影响机制、各花色类型的系统发育信号, 以及优势花色与特殊花色的演化驱动差异。研究希望构建花色多样性与空间分布格局的综合认知框架, 揭示花色演化的生态适应策略与遗传约束机制, 为高寒、干旱区植物多样性保护、资源利用及生态系统响应环境变化提供基础数据与理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

甘肃省(32° 31' ~42° 57' N, 92° 13' ~108° 46' E)位于中国西北地区, 面积达454 000 km², 其地貌复杂多样, 山地、高原、平川、河谷、沙漠、戈壁纵横交错; 地势自西南向东北呈倾斜状, 地形狭长, 东西长1 659 km, 南北宽530 km; 全省平均海拔较高, 最高海拔超过5 800 m, 为肃北蒙古族自治县党城湾镇团结峰, 最低海拔550 m, 为文县中庙乡罐子沟^[6-7]。甘肃气候类型包括亚热带季风气候、温带季风气候、温带大陆性气候和高原山地气候。

1.2 研究方法

1.2.1 物种信息获取

研究参考《甘肃野生植物》^[8]《中国植物志》^[9]和《Flora of China》^[10]等文献, 收集甘肃省木本被子植物种类、花色信息及分布的海拔范围, 由2名研究人员独立观察, 结果一致率大于95%, 不一致的样本进行了复核, 并针对数据库中缺乏花色文字记录的类群, 参照植物志中的物种形态图片开展人工鉴定并完善相关信息。

1.2.2 统计方法

在获取各物种的花色信息后, 研究将木本被子植物的主要部分(如花瓣或花冠)的颜色定义为花的颜色, 若文献仅描述“边缘带红晕”“基部深色”, 则需结合模式标本或

权威植物志插图确认是否达到复色阈值。复色阈值指在同一发育阶段(盛花期)内, 花具有不少于2种肉眼可辨的不同色相(非同一色相的明暗变化), 且各色相面积占比均不小于15%。若满足复色阈值, 则按照2种或2种以上颜色统计; 若各色相面积占比均小于15%, 则按照花瓣或花冠的主色调颜色进行统计。如果同一物种的花有2种或3种独立存在的颜色, 则将该木本被子植物的花色信息统计2次或3次, 绝大多数花仅有1种花色。研究将不同木本被子植物的花色分为红色系、黄色系、绿色系、紫色系、蓝色系、白色系六大色系, 红色系包括红色、淡红色、深红色、粉白色、粉红色、深粉色、淡粉色、紫红色、玫瑰色、玫瑰红色、蔷薇色、浅红褐色、黑红褐色、暗红色、红棕色、砖红色、赤褐色、橙红色、蔷薇红色; 黄色系包括黄色、淡黄色、浅黄色、深黄色、暗黄色、黄褐色、淡黄绿色、淡桔黄色、橙黄色、金黄色、橙色、黄棕色、黄白色、淡黄白色; 绿色系包括绿色、浅绿色、深绿色、淡绿色、淡青色、绿白色; 紫色系包括紫色、淡紫色、深紫色、淡紫白色、黑紫色、紫褐色、浅紫色、粉紫色、蓝紫色、紫黑色、紫棕色; 蓝色系包括蓝色、淡蓝色; 白色系包括白色、淡白色、银白色、乳白色、灰白色。

甘肃省木本被子植物分布在海拔550~4 750 m范围内, 因此研究以300 m为分隔单位, 将甘肃省海拔范围划分为14个海拔区间, 分别为550~850 m(H1), 850~1 150 m(H2), 1 150~1 450 m(H3), 1 450~1 750 m(H4), 1 750~2 050 m(H5), 2 050~2 350 m(H6), 2 350~2 650 m(H7), 2 650~2 950 m(H8), 2 950~3 250 m(H9), 3 250~3 550 m(H10), 3 550~3 850 m(H11), 3 850~4 150 m(H12), 4 150~4 450 m(H13), 4 450~4 750 m(H14)。如果同一物种在多个海拔区间都有分布, 则在每个海拔区间都进行统计。

研究将甘肃省木本被子植物分为乔木、灌木和木质藤本3类。乔木定义为具有直立茎或树干, 且潜在高度至少大于5 m的木本植物; 灌木定义为无明显主干、基部多分枝、树高小于5 m的丛生木本植物; 木质藤本定义为无主干的物种, 茎木质化, 不能直立, 需借助其他物体攀缘或缠绕上升^[11]。若植物志中记载的植物生活型为“灌木或小乔木”, 均记录为“乔木”, “半灌木”均记录为“灌木”。

1.2.3 分析方法

研究使用卡方检验来分析木本被子植物不同花色类型间的差异显著性, 并使用独立样本T检验与单因素方差分析法, 分析不同生活型植物花色组成间的差异显著性。

为探究地理环境因子对植物花色的影响, 研究采用气温、降水、紫外线辐射等数据进行相关性分析。本文从WorldClim数据库获取了空间分辨率为30弧秒(约1 km²)^[12]的年总降水量和年平均气温数据, 并从gIUW网站获取空间分辨率为15弧分^[13]的紫外辐射数据。

研究还根据被子植物APG III分类法, 利用R语言构建系统发育树, 使用程序包进行系统发育的K值检测, 判定标准如下: 若系统信号K值大于1且通过显著性检验

($P<0.05$)，表明性状具有强烈的系统发育信号；若 K 值小于 1 且同样通过显著性检验 ($P<0.05$)，则表明性状具有较弱的系统发育信号；若未通过显著性检验 ($P>0.05$)，则表明性状不存在系统发育信号^[14]。

最后，研究采用 Excel、SPSS 20.0、Origin 2024 以及 R 语言等软件进行数据分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 甘肃省木本被子植物花色组成

研究对甘肃省 1 273 种木本被子植物的花色进行统计，共得到 1 273 条花色信息，其中有 226 种木本被子植物具有 2 种花色，8 种木本被子植物具有 3 种花色。统计结果表明，甘肃省不同色系的木本被子植物种数差异极显著 ($\chi^2=693.176$, $P<0.001$)。其中，开黄色系花的种数最多，共 448 种，占花色信息总数的 35.19%，如锦鸡儿属 *Caragana*、亚菊属 *Ajania*、瑞香属 *DaPhne* 等植物；开白色系花的种数也较多，共 380 种，占花色信息总数的 29.85%，如珍珠梅属 *Sorbaria*、绣线菊属 *Spiraea*、女贞属 *Ligustrum* 等植物；开蓝色系花的种数最少，仅 18 种，占花色信息总数的 1.41% (图 1)。

2.2 不同生活型木本被子植物花色组成

甘肃省木本被子植物中，乔木有 349 种，灌木有 846 种，木质藤本有 78 种。统计结果表明 (表 1)，不同生活型的花色占比差异极显著 ($\chi^2=72.480$, $P<0.001$)。

乔木的花色以黄色系为主，有 151 种，占乔木总数的 43.27%；开紫色系花的乔木种数最少，仅 12 种，占乔木总种数的 3.44%；未发现开蓝色系花的乔木。

灌木的花色以白色系和黄色系为主，分别有 264 种和 262 种，占灌木总种数的 31.21% 和 30.97%；开蓝色系花的灌木种数最少，仅 16 种，占灌木总种数的 1.89%。

木质藤本在甘肃省分布的种类较少，其中开黄色系花的种数最多，有 35 种，占木质藤本总物种数的 44.87%；其次是开白色系花的有 24 种，占木质藤本总数的 30.77%。这 2 种色系的种类占木质藤本总种数的 75.64%。其他 4 种花色的木质藤本种数较少，共 19 种，仅占木质藤本总种数的 24.35%。

对比不同生活型的同一花色种数发现 (表 1)，开黄色系花的种类在 3 种生活型中均占优势，在木质藤本中占比最大，但在灌木中的占比显著小于其他 2 种生活型 ($P<0.05$)。开白色系花的种类在 3 种生活型中也占有较大比例，但在 3 种生活型间无显著差异 ($P>0.05$)。开红色系花、绿色系花和紫色系花的种类在 3 种生活型中均占比较小，其中，开红色系花的种类在 3 种生活型中的占比差异显著；乔木中开绿色系花的种类占比显著大于灌木和木质藤本，而乔木中开紫色系花的种类占比显著小于灌木和木质藤本。灌木和木质藤本中开蓝色系花种类的占比极小，且二者之间差异不显著。

2.3 不同海拔木本被子植物花色组成

甘肃省最低海拔 550 m，最高海拔超过 5 800 m。其中木本被子植物分布在海拔 550~4 750 m 区域，海拔超过 4 750 m 的地区不再适合木本植物生长。

研究发现，开黄色系花的种类在 H1~H14 海拔区间内均占优势，占各区间内木本被子植物总种数的 31.60%~50.00%；开白色系花的种类分布在海拔 550~4 250 m 的范围内，在各海拔区间内的占比也较大，为 12.00%~32.10%；开红色系花的种类生长在海拔 4 750 m 以下区域，且在海拔区间内占比不大，为 12.00%~22.55%；开绿色系花和紫色系花的种类在各海拔区间均有分布，但均占比不大；开蓝色系花的种类分布在海拔 4 150 m 以下区域，且在海拔区间内占比极小，仅占 1.30%~2.82% (图 2)。

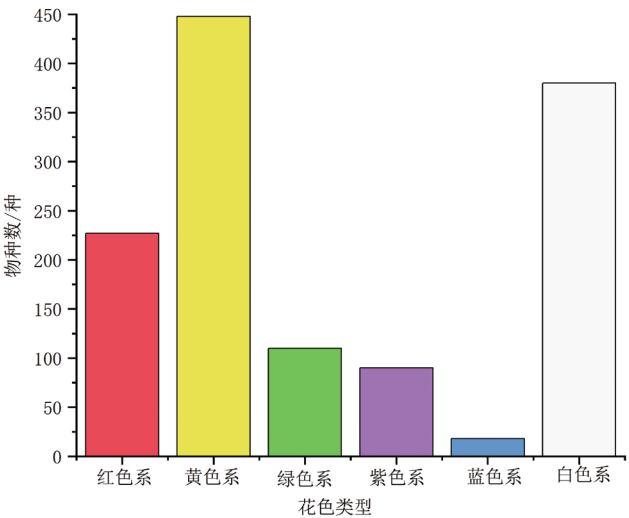


图 1 不同花色类型木本被子植物种数

Fig.1 Number of woody angiosperm species with different flower color types

表 1 不同生活型间花色占比的卡方检验

Tab.1 Chi-square test of the proportion of flower colors among different life forms

花色类型	乔木	灌木	木质藤本
红色	12.03%b	21.39%a	5.13%c
黄色	43.27%a	30.97%b	44.87%a
绿色	14.90%a	6.15%b	7.69%b
紫色	3.44%b	8.39%a	8.97%a
蓝色	0.00%b	1.89%a	2.56%a
白色	26.36%a	31.21%a	30.77%a

$\chi^2=72.480$, $P<0.001$

注：标注相同字母的组间无显著性差异，标注不同字母的组间存在显著性差异。

随着海拔梯度的不断上升,各个色系花的物种数呈现先增加后减少的趋势,与海拔梯度均呈显著负相关关系(图3)。

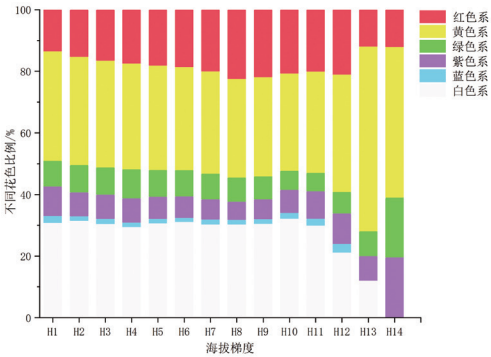


图2 不同海拔梯度木本被子植物花色占比
Fig.2 Proportion of flower colors of woody angiosperms across different altitude gradients

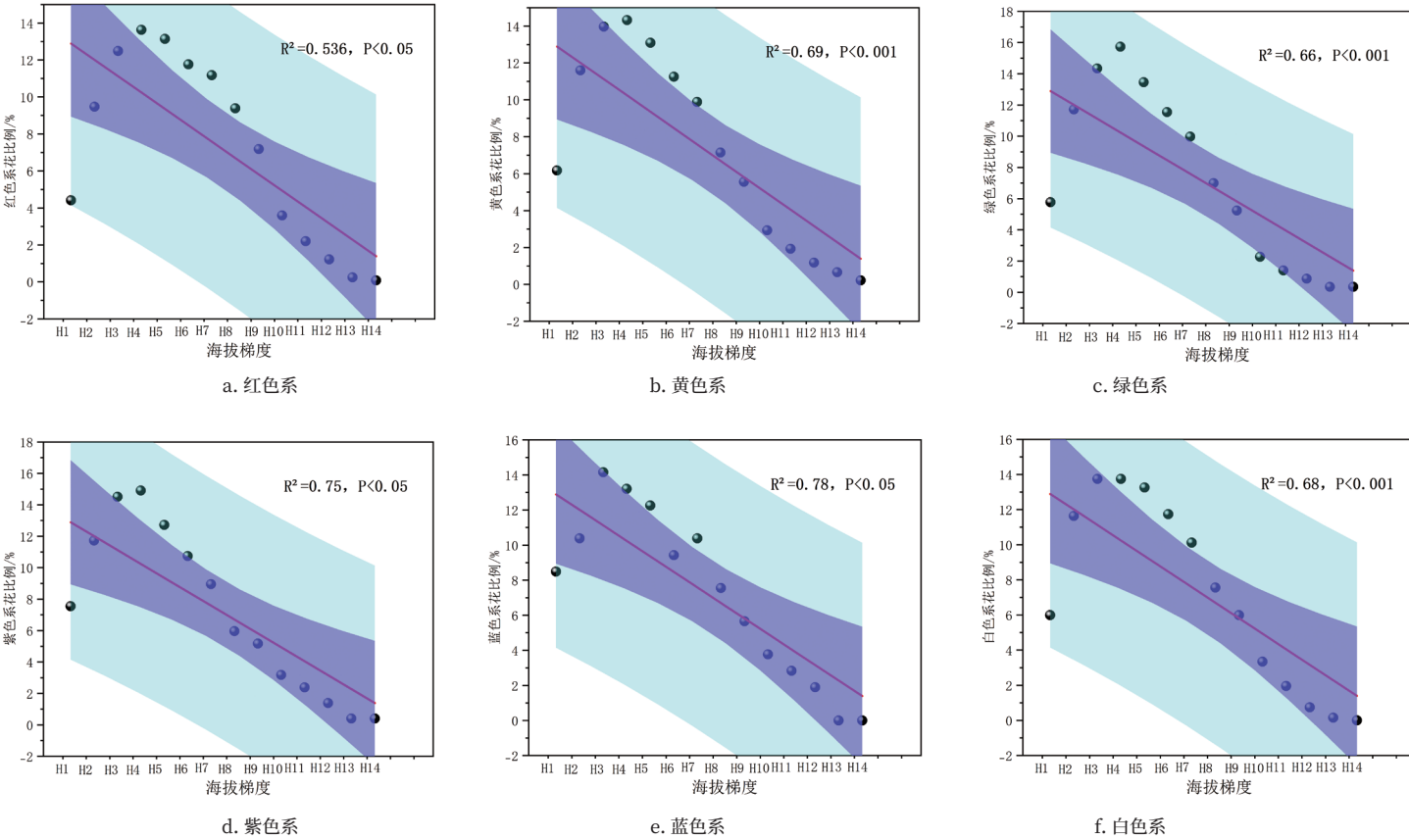
2.4 不同生活型花色的垂直分布格局

研究发现,甘肃省乔木分布在海拔550~3850 m范围内,在各海拔区间内开黄色系花的种类占比均为最大,占各区间内乔木总种数的33.83%~47.01%;开白色系花的乔木在各海拔区间内也占比较大,为14.29%~33.33%;开红色系花和绿色系花的种类在各海拔区间均占比不大;开紫色系花的乔木只分布在海拔3250 m以下区域,且在海拔区间内占比极小,仅占0.66%~5.22%;乔木中未发现开蓝色系花的物种(图4-a)。

灌木在甘肃省内的分布海拔范围为550~4750 m,在各海拔区间内开黄色系花的种类占比均为最大,占各区间内灌木总种数的25.66%~60.00%;开白色系花的灌木分布在海拔550 m~

4350 m的范围内,在各海拔区间内也占比较大,为12.00%~37.17%;开红色系花的灌木生长在海拔4750 m以下区域,且在海拔区间内占比不大,为10.00%~25.06%;开绿色系花和紫色系花的灌木在各海拔区间占比不大;开蓝色系花的灌木分布在海拔4150 m以下区域,且在海拔区间内占比极小,仅占1.60%~3.54%(图4-b)。

甘肃省木质藤本主要分布于海拔550~4150 m的范围内,在各海拔区间内开黄色系和白色系花的种类占比均为最大,分别占各区间内木质藤本总种数的23.08%~54.00%和27.03%~50.00%;开紫色系花的木质藤本生长在海拔3550 m以下区域,且在海拔区间内占比不大,为8.20%~15.38%;开蓝色系花的



注: 黑点代表原始实测数据点; 红线为一元线性回归拟合线, 代表花色比例随海拔梯度变化的预测趋势; 紫色区域为置信带, 表示回归直线本身的不确定性; 蓝色区域为预测区间, 代表单个观测数据点的预期波动范围。

图3 花色与海拔的一元线性回归关系
Fig.3 Univariate linear regression relationship between flower color and elevation

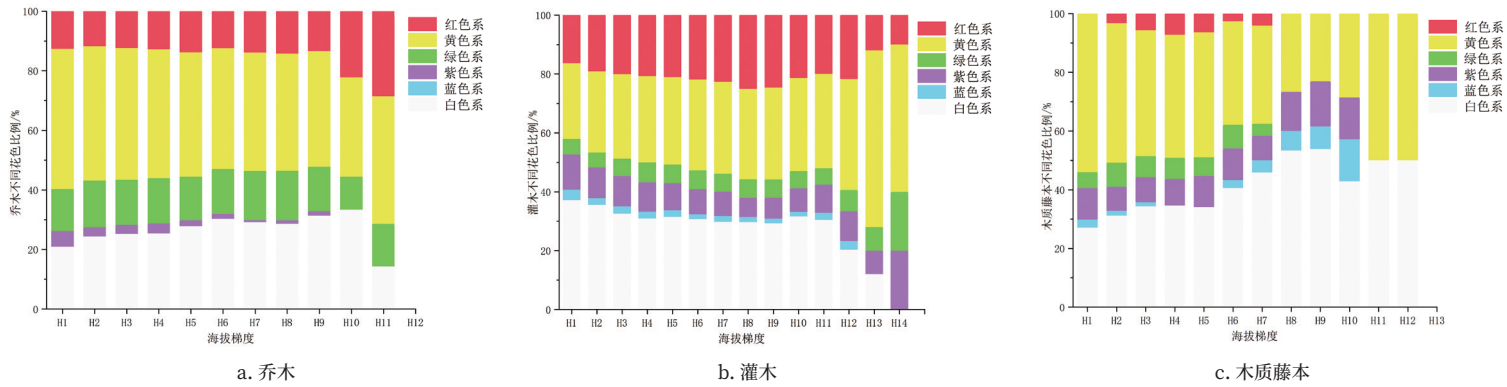


图4 不同生活型植物花色在不同海拔段的占比

Fig.4 Proportion of flower colors by plant life form across elevation zones

木质藤本分布在海拔 3 550 m 以下区域, 在各海拔区间内占比不大, 为 1.43%~14.29%; 开红色系花、绿色系花的木质藤本生长在海拔 2 650 m 以下区域, 且在海拔区间内占比极小, 分别为 2.70%~5.71% 和 4.17%~8.11% (图 4-c)。

2.5 地理环境因子对花色的影响

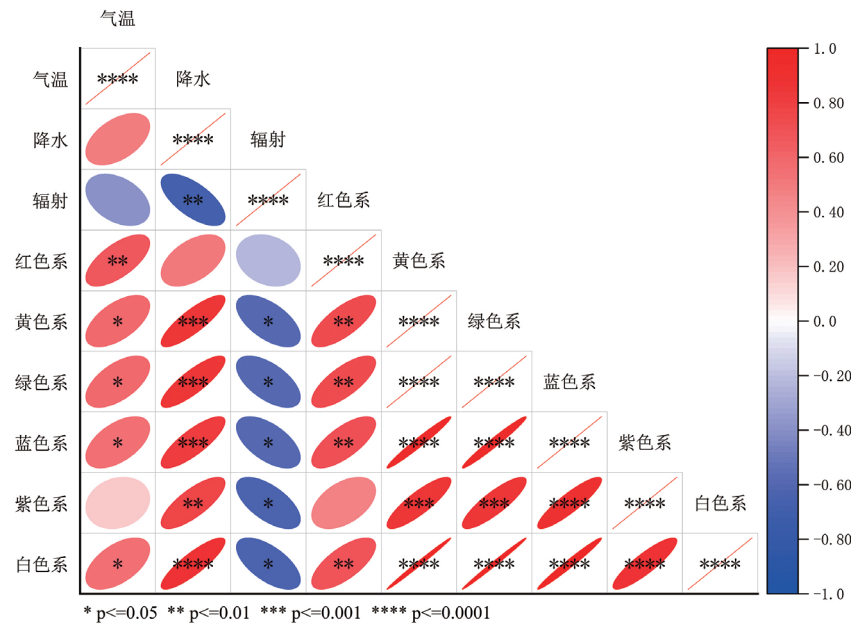
研究发现, 花色物种数占比和地理环境因子间存在规律性变化 (图 5)。

气温与红色系、黄色系、绿色系、蓝色系、白色系花的比例呈显著正相关关系 ($P<0.05$), 与紫色系花的比例无显著相关性; 降水与黄色系、绿色系、蓝色系、紫色系、白色系花的比例均呈极显著正相关关系 ($P<0.01$); 紫外线辐射与除红色系外的花的比例呈显著负相关关系 ($P<0.01$)。

2.6 花色的系统发育信号检测

甘肃省木本被子植物花色系统

发育信号显示 (表 2), 不同花色的系统发育保守性存在显著分化 (图 6): 白色系、红色系、黄色系花的 Blomberg's K 均小于 1 且 P 值小于 0.05, 表明这 3 类花色的种属内比例存在显著的系统发育信号, 其演化符合弱于布朗运动模型的保守性特征, 亲缘关系相近的类群在花色比例上仍表现出显著的相似性; 而绿色、紫色、蓝色花的 Blomberg's K 值均小于 1, P 值均远大于 0.05, 说明这 3 类花色的种属内比例无显著系统发育信号, 其性状演化与系统发育关系无显著关联, 近缘类群的花色比例未表现出明显的保守性。整体来看, 甘肃省木本植物不同花色的系统发育信号存在明显分异, 优势花色白、红、黄色系受遗传背景约束更强, 而特殊花色绿、



注: * $P<0.05$ 表示显著相关; ** $P<0.01$ 表示极显著相关; *** $P<0.001$ 表示高度极显著相关; **** $P<0.0001$ 表示极高极显著相关。

图5 花色与地理环境因子相关性分析

Fig.5 Correlation between flower color and geographical environmental factors

表 2 甘肃省木本被子植物不同花色种属内比例的系统发育信号

Tab.2 Phylogenetic signals of flower color proportions in Gansu woody angiosperms

花色	Blomberg's K	P
白色	0.394	0.003
红色	0.368	0.014
黄色	0.423	0.003
绿色	0.266	0.541
紫色	0.275	0.541
蓝色	0.294	0.541

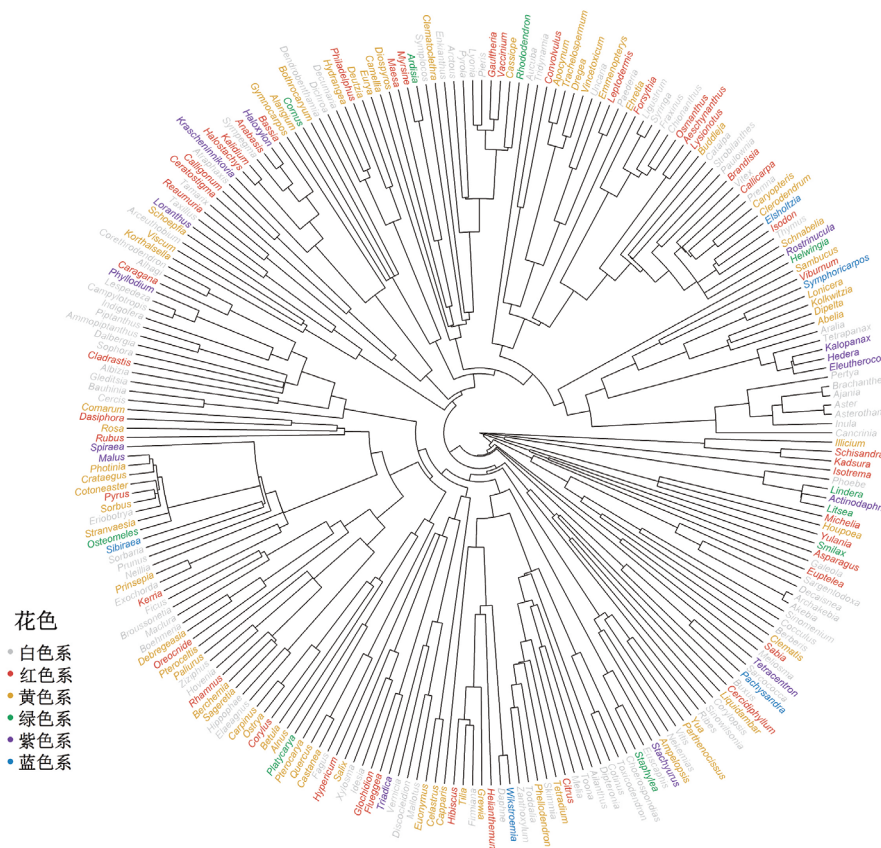


图6 甘肃省木本被子植物的系统发育树
Fig.6 Phylogenetic tree of woody angiosperms in Gansu Province

紫、蓝色系的演化更多受局域环境选择驱动。

3 讨论

3.1 花色组成特征及其生活型分异机制

通过对甘肃省木本被子植物花色特征研究发现,开黄色系花种数最多,其次是白色系花,开蓝色系花的种数最少。这与李红利^[15]的研究结果一致,该研究指出黄色系花主要分布在中国西北地区,白色系花多分布于东南部地区,且在东北和西北地区所占比例较少;周贱平等^[16]对河源市建成区401种木本植物的调查表明,观花植物中花色同样以红色、白色和黄色系为主,显示出不同气候带下木本植物花色组成的共性规律。各类花色分布比例的差异,可能与环境因子、传粉者选择压力或中性种群结构有关^[17]。随着海

拔升高,气温下降、传粉者多样性降低,蝇类逐渐成为高海拔地区的主要传粉类群,蝇类更偏好人眼感知下的白色与黄色花朵,这类花的光谱反射特征在蜂类的视觉颜色空间中主要对应蓝绿色与绿色信号区间^[18]。这种传粉者功能群的替代效应解释了为何红、紫、蓝色系花物种数在中海拔达到峰值后向高海拔递减,而黄、绿、白色系花虽呈现相似趋势,但其统计显著性更强($P<0.001$),可能与高海拔地区蝇类主导的选择压力更为一致有关。

研究发现,不同生活型间花色组成的差异极显著。木质藤本多攀缘于林缘或林窗区域,光照充足,黄色系花占比大。黄色系花对日行性传粉昆虫(如蜜蜂)具有强视觉吸引力,更易被识别,可提高授粉效率^[19]。相比之下,灌木种类繁多、生态位多样,部分种类可能依赖风媒或非视觉传粉

机制,从而降低了对高色彩饱和度花色的选择压力。白色系花虽然不具有鲜艳的色彩,但能有效反射全波段可见光,在弱光环境中具有较高的可见度,且常伴随着芳香气味,能够吸引夜间活动的蛾类或对颜色不敏感的传粉者^[20],进一步提升传粉成功率,故乔木中的白色系花在不同生境中均能稳定繁殖,维持较高的占比。蓝色系花的合成通常依赖于复杂的花青素修饰机制及液泡pH调控^[21],乔木生命周期长、代谢路径保守,缺乏演化出稳定蓝色表型的选择压力或生化基础。

3.2 花色垂直分布格局与生活型的环境适应策略

甘肃省地形复杂,海拔跨度大。研究发现,木本被子植物最高分布海拔为4750 m,超过4750 m的区域温度过低、辐射较强、生长季短,环境条件严酷,已不再适宜木本植物生存。不同海拔梯度内植物生长受到光照强度、紫外辐射、温度和水分等诸多非生物因素的影响不同^[22]。相关研究发现,在不同的光照强度影响下,低海拔地区多为红色花,高海拔地区多为蓝紫色花^[23]。不同生活型花色的垂直分布格局不同,反映出不同生活型植物对环境梯度和繁殖策略的不同适应模式。崔治家^[24]研究指出,深色(含蓝紫色系)花较多集中在合瓣花的草本或灌木,且多局限于青藏高原边缘高海拔湿润谷地;真正的本土乔木花色以淡色系种类占绝对优势,说明甘肃植物区系形成与喜马拉雅山脉隆升有关,深色系花尚未渗入乔木层便被生态过滤。乔木中未发现开蓝色系花的种类,而红色系观花乔木在园林绿化中具有重要地位。叶超宏等^[25]通过对广东适生樱花品种的系统筛选,推介了中国红樱花 *Prunus* ‘Zhongguohong’ 等5种适应性强、观赏价值高的红色系樱花品种,证实了红色系花在城市景观营造中的核心作用,这与本研究中红色系花在乔木层占一定比例(12.03%)的发现相互印证。与乔木相比,灌木更矮,生长周期更短,不仅可以生长在森林中,也可以生长在高环境压力地区,如干旱的沙漠、淹水的湿地、

营养不足的土壤^[26]。高压力的环境条件会使植物生成更多花青素,有利于合成更多红色系、蓝色系、紫色系花^[27]。木质藤本的花色格局最为独特,是唯一蓝色花占比相对较高(最高14.29%)的生活型^[4],这一特征与其攀缘生长的习性及其所依赖的传粉者类型有关。蓝色系花常通过蜂类昆虫进行传粉,传粉者对蓝光波段具有较高的视觉敏感性,蓝色花可通过反射该波段光线形成视觉信号^[28],提高传粉者的访花效率。

本研究发现气温与红、黄、绿、蓝、白色系花的比例均呈显著正相关,而与紫色系无显著相关性,这一结果与花色演化的生理生态学机制密切相关。气温作为关键的环境筛选因子,直接影响花瓣色素合成途径的酶活性与代谢速率^[29]。研究表明,较高的温度有利于类胡萝卜素(黄、橙、红色)和黄酮类化合物(白色、淡黄色)的合成,这些色素在温暖环境中具有较低的能量消耗和较高的合成效率^[30]。

此外,研究揭示了甘肃省木本被子植物花色系统发育信号的显著异质性:白色、红色和黄色系花表现出显著的系统发育保守性,而绿色、紫色和蓝色系花则缺乏显著的系统发育信号。这一发现与 Alexander Skeels^[31]等提出的系统发育信号理论框架相吻合,即当 Blomberg's K 值小于 1 时,性状演化呈现弱于布朗运动模型的保守性特征,表明亲缘关系相近的类群在性状上仍保持显著相似性。当植物面临新的传粉环境或竞争压力时,花色性状的快速演化可能成为生态位分化的重要机制^[32],本研究中绿色、紫色和蓝色花的种属内比例变异与系统发育关系脱钩,恰好为这种局域适应性演化提供了证据。

4 结论

本研究通过对甘肃省木本被子植物的花色特征进行系统调查与空间分析,结合海拔等因子,揭示了甘肃省木本被子植物花色特征及其空间分布格局。研究发现:甘肃省木本被子植物花色组成差异极显著,黄色系最多,白色次之,蓝色最少。不同生活型花色组成差异极显著,黄、白色系占主导,红、绿、紫色系占比低;乔木无蓝色系花。甘肃省木本被子植物分布在海拔 550~4 750 m 区域,各海拔区间内均以开黄色系花的种类占优势,白花次之;蓝花灌木仅见于 4 150 m 以下,红、绿花木质藤本仅分布于 2 650 m 以下,各花色的物种数与海拔梯度之间存在均呈负相关关系;水热条件总体正向促进各色系物种比例;白色、红色、黄色系花具有显著的系统发育保守性,而绿色、紫色、蓝色系花的演化主要受环境选择驱动。

本研究系统揭示了甘肃省木本被子植物花色的组成特征,丰富了该区域木本植物花色生态研究,为理解西北地区植物区系形成机制提供了基础数据。本研究将花色分类、生活型划分、海拔梯度分析、地理环境因子关联分析与系统发育信号检测有机结合,形成了“组成-分布-环境-进化”四位一体的研究范式;结合甘肃地理特征,揭示高海拔传粉者替代、生活型生态位分化对花色的筛选作用,阐明优势花

色遗传保守、特殊花色环境驱动的演化模式,为山地植物花色适应机制研究提供典型案例。

本研究仍存在一定的局限性:1)对于花色的分类研究仅仅采用阅读文献和人工识别的方法,分类完全依赖文献文字描述。研究未明确不同文献来源的数据贡献比例,使得描述误差的溯源分析缺乏基础。2)未进行图像色彩校正,可能导致花色判断的系统性偏差。植物志中的形态图片经过拍摄、印刷/数字化处理,色彩还原度受设备、光线及后期处理影响,且数字化图像与活体标本的色彩差异可达极显著,远超人眼可接受阈值^[33]。3)未通过系统发育独立对比等方法剔除科属间系统发育历史对花色分布的潜在影响,可能部分反映了特定科属在进化历史上的适应性辐射或地理分布局限,而非完全源于当前环境因子的直接筛选作用。

未来研究可聚焦以下方向:1)结合高精度光谱分析技术,将花色细化为具体的波长参数,并整合花大小、花蜜产量、气味挥发物等多维花部性状,构建更全面的花部综合征垂直分布模型。2)结合分子系统发育树,采用系统发育广义最小二乘法(Phylogenetic Generalized Least Squares, PGLS)或系统发育混合模型,进一步区分花色分布格局中“历史遗留效应”与“当前生态适应”的相对贡献,以更精确地揭示花色演化的驱动机制。3)可利用物种分布模型预测在全球变暖情景下,甘肃木本植物花色组成及分布边界的潜在漂移轨迹,评估高海拔特有花色类群的灭绝风险。

注:图片均由作者自绘。

参考文献:

- [1] DELMAS L E C, KOOYMAN M R, ROSSETTO M. Evolutionary constraints and adaptation shape the size and colour of rain forest fruits and flowers at continental scale[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, 29 (5): 830-841.
- [2] TARRANT S, OLLERTON J. How many flowering plants are pollinated by animals?[J]. *Oikos*, 2011, 120 (3): 321-326.
- [3] LIU X, WANG Y, SHEN S. Transcriptomic and metabolomic analyses reveal the altitude adaptability and evolution of different colored flowers in alpine *Rhododendron* species[J]. *Tree physiology*, 2021, 42 (5): 1100-1113.
- [4] WANG Q, GUO Q, CHI X, et al. Evolutionary history and climate conditions constrain the flower colours of woody plants in China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2022, 15 (1): 196-207.
- [5] 汤晓辛, 黄双全. 花色多样性与变异的研究进展[J]. *植物分类与资源学报*, 2012, 34 (3): 239-247.
- [6] 王彦彪. 甘肃省木兰亚纲植物区系地理及分布格局研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2012.
- [7] 史静. 甘肃省草地植物区系及植物资源调查研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014.
- [8] 刘晓娟, 孙学刚. 甘肃野生植物[M]. 杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2024: 1-1772.
- [9] 中国植物志编委会. 中国植物志第四十九卷第三分册[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1-281.
- [10] WU Z, RAVEN P H, HONG D. *Flora of China*. Vol. 13 (Clusiaceae

through Araliaceae[M]. Beijing: Science Press, 2007.

[11]FANG J, WANG Z, TANG Z, et al. Large-scale patterns of tree species richness and the metabolic theory of ecology[J]. Global Ecology and Biogeography, 2012, 21 (4) : 508-512.

[12]HIJMANS R J, CAMERON S E, PARRA J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas[J]. International Journal of Climatology, 2010, 25 (15) : 1965-1978.

[13]BECKMANN M, VÁCLAVÍK T, MANCEUR A M, et al. glUV: a global UV-B radiation data set for macroecological studies[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2014, 5 (4) : 372-383.

[14]REVELL J L. phytools: An R package for phylogenetic comparative biology (and other things)[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2012, 3 (2) : 217-223.

[15]李红利. 全球木本植物花色与果实类型关系[D]. 宁波: 宁波大学, 2023.

[16]周贱平, 高晓霞. 河源市建成区城市绿地木本植物调查[J]. 广东园林, 2021, 43 (2) : 82-84.

[17]CHITTKA L, RAINE E N. Recognition of flowers by pollinators[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2006, 9 (4) : 428-435.

[18]ARNOLD S E J, SAVOLAINEN V, CHITTKA L. Flower colours along an alpine altitude gradient, seen through the eyes of fly and bee pollinators[J]. Arthropod-Plant Interactions, 2009, 3 (1) : 27-43.

[19]KEVAN G P, MENZEL R. The plight of pollination and the interface of neurobiology, ecology and food security[J]. The Environmentalist, 2012, 32 (3) : 300-310.

[20] TSAI W-C, LEE P-F, CHEN H-L, et al. PeMADS6, a GLOBOSA/PISTILLATA-like gene in *Phalaenopsis equestris* involved in petaloid formation, and correlated with flower longevity and ovary development[J]. Plant & Cell Physiology, 2005, 46 (7) : 1125-1139.

[21]JANNICE F, H C S B. Wind of change: new insights on the ecology and evolution of pollination and mating in wind-pollinated plants[J]. Annals of botany, 2009, 103 (9) : 1515-1527.

[22]VAN DER KOOIJ CJ, ELZENGA JT, DIJKSTERHUIS J, et al. Functional optics of glossy buttercup flowers[J]. Journal of the Royal Society, Interface, 2017, 14 (127) : 20160933.

[23]聂昌达, 王宇, 陈伏生, 等. 贡嘎山有花植物花色的时空分布格局及其影响因素[J]. 江西农业大学学报, 2025, 47 (2) : 373-384.

[24]崔治家. 甘肃被子植物中国特有类群的区系研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2006.

[25]叶超宏, 陈家艳, 胡晓敏, 等. 广东适生樱花及其园林应用[J]. 广东园林, 2014, 36 (5) : 59-61.

[26]CHAPIN F S, AUTUMN K, PUGNAIRE F, et al. EVOLUTION OF SUITES OF TRAITS IN RESPONSE TO ENVIRONMENTAL STRESS[J]. American Naturalist, 1993, 142: S78-S92.

[27]CHALKER - SCOTT L. Environmental Significance of Anthocyanins in Plant Stress Responses[J]. Photochemistry and Photobiology, 1999, 70 (1) : 1-9.

[28]王晓月, 汤晓辛, 童泽宇, 等. 植物与传粉者地理镶嵌的协同演化: 过程、证据与展望[J]. 科学通报, 2019, 64 (16) : 1702-1710.

[29]LACEY E P. Temperature and the evolution of flower color: A review[J]. American Journal of Botany, 2026, 113 (1) : e70106.

[30]DALRYMPLE R L, KEMP D J, FLORES-MORENO H, et al. Macroecological patterns in flower colour are shaped by both biotic and abiotic factors[J]. New Phytologist, 2020, 228 (6) : 1972-1985.

[31]SKEELS A, DINNAGE R, MEDINA I, et al. Ecological interactions shape the evolution of flower color in communities across a temperate biodiversity hotspot[J]. Evolution Letters, 2021, 5 (3) : 277-289.

[32]SMITH D W. Using phylogenetics to detect pollinator-mediated floral evolution[J]. New Phytologist, 2010, 188 (2) : 354-363.

[33]QIN C, MA H, MANDIZADZA O O, et al. Reporting quality of meta-analyses in acupuncture: Investigating adherence to the PRISMA statement[J]. Medicine, 2024, 103 (39) : e39933.

作者简介:

苏龙丽/2000年生/女/甘肃陇南人/甘肃农业大学林学院(兰州730070)/在读硕士研究生/专业方向为野生植物资源调查

刘晓娟(*通信作者)/1980年生/女/甘肃天水人/博士/甘肃农业大学林学院(兰州730070)/副教授/研究方向为森林植物多样性/E-mail: liuxiaojuan@gsau.edu.cn

张晓玮/1985年生/男/陕西宝鸡人/博士/甘肃农业大学林学院(兰州730070)/副教授/研究方向为林木抗逆生理生态、群落生态学、森林生态系统