西北林学院学报 2019,34(2):84-91
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2019.02.13

基于 LHS 策略的延河流域植物功能型划分

杨玉婷[1],曾鸿文[4],温仲明[2,3*],王　杨[1]

(1.西北农林科技大学 动物科技学院,陕西 杨陵 712100;2.西北农林科技大学 水土保持研究所,陕西 杨陵 712100;
3.中国科学院教育部 水土保持与生态环境研究中心,陕西 杨陵 712100;4.西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100)

摘　要:以延河流域 69 个主要物种为研究对象,测定其植株高(height,H)、种子干重(seed matter,SM)和比叶面积(specific leaf area,SLA)3 个功能性状,探讨 leaf-height-seed(LHS)策略在延河流域的适用性、主要植物的功能型划分及各功能型植物在延河流域的分布。结果表明:1)LHS 策略能很好地适用于延河流域,且通过该策略将 69 个物种分成了 5 个植物功能型。功能型Ⅰ植物属于干扰型和竞争型,适合生长于高干扰、高竞争和低压力的环境中;功能型Ⅱ植物属于杂草型,适合生长于高干扰、低竞争和低压力环境;功能型Ⅲ植物属于耐胁迫型,适合生长在高胁迫和高竞争的环境中;功能型Ⅳ植物属于竞争型,适合生长于高竞争和低压力的环境中;功能型Ⅴ植物属于竞争型和杂草型,适合生长于低胁迫和高竞争环境。2)延河流域具有较明显的环境梯度变化,各个功能型植物在流域中表现出一定的分布特点,从南向北(森林带—森林草原带—草原带)植物功能型依次分布为植物功能型Ⅳ(植物功能型Ⅰ为伴生种)→植物功能型Ⅲ和植物功能型Ⅳ(植物功能型Ⅰ、Ⅱ、Ⅴ为伴生种)→植物功能型Ⅲ(植物功能型Ⅰ为伴生种)。

关键词:延河流域;LHS 策略;功能性状;植物功能型

中图分类号:S718.3　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-7461(2019)02-0084-08

Classification of Plant Functional Types Based on LHS Strategy in Yanhe River Basin

YANG Yu-ting[1],ZENG Hong-wen[4],WEN Zhong-ming[2,3*],WANG Yang[1]

(1. *College of Animal Science and Technology, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *Shaanxi, China*;
2. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *Shaanxi, China*;
3. *Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling* 712100, *Shaanxi, China*;
4. *College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *Shaanxi, China*)

Abstract: The paper focused on 69 dominant plants in the stable natural plant community in the Yanhe River basin, three traits of each sample were measured, including plant height (H), seed mass (SM), specific leaf area (SLA), to test the leaf-height-seed (LHS) strategy applicability in Yanhe River basin, to classify plant functional types (PFTs) of each species and the distribution of each functional plant functional types. The results showed that: 1) the LHS strategy could be well applied in the Yanhe River basin, and 69 dominant plants were divided into 5 kinds of plant functional types. PFT Ⅰ plant belonged to the interference and competition type which was suitable for growth in high interference, high competition and low stress environment. PFT Ⅱ plant belonged to the weed type which was suitable for growing in high interference, low stress and low competition environment. PFT Ⅲ plant belonged to the stress resistant type, which was suitable for growing in high stress and high competition environment. PFT Ⅳ plant belonged to the com-

收稿日期:2018-06-22　**修回日期**:2018-08-31
基金项目:国家自然科学基金"黄土高原刺槐环境适应机制、成本与群落性状结构及功能变化"(41671289)。
作者简介:杨玉婷,女,在读硕士,研究方向:植物生态恢复。E-mail:yutingyang0509@163.com
* **通信作者**:温仲明,男,副研究员,博士生导师,研究方向:植物生态恢复。E-mail:zmwen@ ms.iswc.ac.cn

petitive type which was suitable for high competition and low pressure environment. PFT Ⅴ plant was a competitive and weed type which was suitable for growing in low stress and high competition environment. 2) Environmental gradients changed obviously in the Yanhe River basin. Various plant functional types also showed different distribution characteristics. In the southern part of the basin (forest belt), PFT Ⅳ was dominant and PFT Ⅰ was associated species. In the central part of the basin (forest steppe belt), PFT Ⅲ and PFT Ⅳ were dominant, PFT Ⅰ, PFT Ⅱ and PFT Ⅴ were associated species. In the northern part of the basin (steppe belt), PFT Ⅲ was dominant and PFT Ⅰ was associated species.

Key words: Yanhe River basin; LHS strategy; functional trait; plant functional type

生活史是指生物从出生到死亡所经历的全过程,也称生长周期。生物在生长过程中通过对能量的合理调节和使用,从而促进自身的生存和繁衍,称为生活史对策[1]。R. H. MacArthur[2]总结了前人对生物生活史的研究,提出了 r-K 选择的生活史策略,采用 r-对策的生物体型小,生长周期短,繁殖率高;采用 K-对策的生物体型大,生长周期长,繁殖率低。r-K 选择理论得到了很多科学家的关注,但亦受到质疑[2-3],r-K 选择理论将生物的生活史解释为由单一选择压作用的结果,过分简化了生物的生活史对策,不能解释生活史格局的多样性,这种做法掩盖了生活史对策的进化。J. P. Grime[4-5]提出了 CSR 模型,分别对应不同的植物策略:竞争型植物 C (Competitors);耐胁迫植物 S(Stress tolerators);杂草型植物 R(Ruderals)。但 M. Westoby[6]认为 CSR 模型不能解释高胁迫和高干扰环境下植物的适应策略,从而提出了 LHS 策略。植物的植株高、比叶面积和种子干重这 3 个植物性状分别具有不同的生态学意义[7-9]。植株高(Height,H)影响植物对光的获取范围[10]、热量的吸收[11]和种子的扩散[12]。比叶面积(specific leaf area,SLA)是最能体现植物状态的功能性状之一[13-14],反映植物的光截获能力和资源获取能力,与植物的同化率[15]、生存对策[16]及叶片寿命密切相关。种子干重(seed mass,SM)与植株的大小(冠层大小、植物质量、茎干直径等)密切相关[17],同时与植物寿命和繁殖寿命有关[18]。LHS 策略为划分植物功能型提供了重要基础。植物功能型(plant functional types,PFTs)是指对环境条件具有相似响应机理的一组植物种,代表陆地主要生态系统中优势植物的组合[16],将植物的生理生态过程和生物物理特征类似的物种组合分析,在变化环境条件下从机理上描述植被的动态[19],与植物的生存策略和资源利用能力密切相关[6],可以对生态系统的行为进行解释[20]。

黄土高原沟壑纵横,地形复杂多变,沟壑密度 5 km·km^{-2},是黄河泥沙的主要来源地,同时也是我国水土流失最为严重的区域之一[21]。延河流域生态环境质量整体一般,生态环境脆弱性以中度等级为主[22]。在一些立地环境条件下,单物种高密度植树,不仅不能涵养水源减少水土流失,还会加剧深层土壤干化,引发系统退化,形成高度不足 3 m 的"小老头树",严重影响退耕还林还草的实施效果。本研究以黄土丘陵区延河流域为研究区,对该流域的 69 种主要植物的植株高度、种子干重和比叶面积 3 个功能性状进行测定,探讨 LHS 策略在延河流域的适用性,并根据 LHS 策略划分各个物种所属的植物功能型,解析不同植物功能型之间的性状差异及其环境适应策略,分析各功能型植物在延河流域的空间分布,以期为该区植被恢复或管理提供依据。

1　研究区概况

延河流域位于陕西省北部(108°45′—110°28′E,36°23′—37°17′N),面积 7 687 km^2,属大陆性半干旱季风气候带,年均降雨量 500 mm,年均温 9℃。是黄河中游河口镇——龙门区间的一级支流,流经志丹、安塞、延安等县市,河网密度约 47 km·km^{-2},平均坡度 4.4‰。从东南向西北,气候、温度呈现明显的梯度变化特征。受环境筛选影响,流域内植物资源丰富,但植被类型随环境梯度的变化明显。植被的分布从南向北依次为森林区(以辽东栎(*Quercus wutaishansea*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)和酸枣(*Ziziphus jujuba*)为主)、森林草原区(以柠条(*Caragana intermedia*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemun*)为主)和草原区(以百里香(*Thymus mongolicus*)、长芒草(*Stipa bungeana*)和大针茅(*Stipa grandis*)为主)。了解不同环境梯度下物种的功能型组成及其环境适应策略,对于该区植被恢复过程中的物种选择及群落构建具有重要意义。

2　材料与方法

2.1　野外试验材料采集

数据采集工作于 2015 年 7—8 月进行。数据采集时,首先根据温度和降雨将延河流域划分为不同

的环境梯度单元，在各环境梯度单元内，充分考虑地形变化，选择具有代表性的 21 个样地做调查（图 1），样地详细情况见表 1。在样地中选择人类活动干扰较轻、自然植被生长较好的具有代表性的地段分别设置乔木、灌木和草本样方，每个样地调查 1 个乔木样方、1 个灌木样方和 3 个草本样方（若调查样地中没有乔木或灌木，则不进行该类样方调查），其中乔木样方面积为 10 m×10 m，灌木样方面积为 5 m×5 m，草本样方面积为 1 m×1 m。在样方中选取长势较好的优势种和主要伴生种，记录物种名，测量植株高度；每个物种选取 10 株分别沿东西南北 4 个方向采集 10 片光照条件良好、完全伸展且没有病虫害的叶片。并且每种植物按相同要求收集 500 颗果实[7]。

表 1 样地基本情况

Table 1 The general situation of experimental sites

序号	样点	纬度/(°)	经度/(°)	海拔/m	年均温/℃	年均降雨量/mm	植被结构
1	张家滩	110.2	36.5	877	10.1	488.1	灌草
2	张家滩	110.2	36.5	877	10.1	488.1	灌草
3	碾庄	109.5	36.6	1 019	9.8	488.6	灌草
4	碾庄	109.5	36.6	1 019	9.8	488.6	灌草
5	黑家堡	109.8	36.6	879	10.3	485.8	灌草
6	黑家堡	109.8	36.6	879	10.3	485.8	灌草
7	黑家堡	109.8	36.6	879	10.3	485.8	灌草
8	甘谷驿	109.8	36.7	917	10.2	480.4	灌草
9	甘谷驿	109.8	36.7	917	10.2	480.4	灌草
10	西河口	109.0	36.6	1 276	8.5	493.6	灌草
11	万花乡	109.2	36.4	1 314	8.5	520.2	乔灌草
12	仁台山	109.5	36.4	1 329	8.3	528.6	乔灌草
13	安塞	109.3	36.8	1 334	8.6	486.2	灌草
14	安塞	109.3	36.8	1 334	8.6	486.2	乔灌草
15	大路沟	108.8	37.2	1 626	6.6	448.4	草
16	大路沟	108.7	37.2	1 704	6.1	450.7	草
17	姚店	109.6	36.6	1 007	10.0	489.0	乔灌草
18	杏河	108.8	36.9	1 268	8.6	459.7	灌草
19	杏河	108.8	36.9	1 268	8.6	459.7	灌草
20	招安	109.1	36.8	1 146	9.3	478.4	灌草
21	镰刀湾	108.9	37.1	1 281	8.1	440.7	草

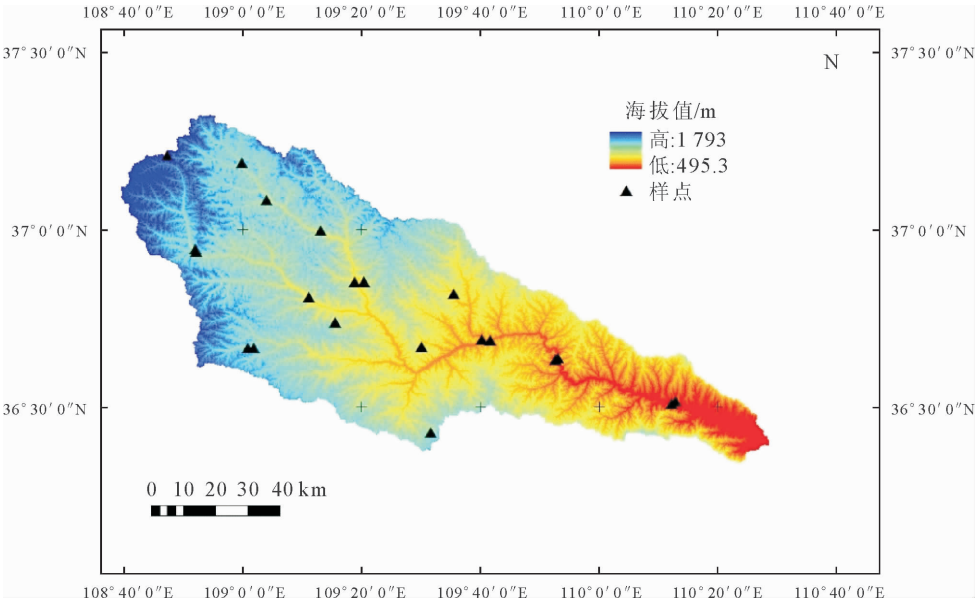


图 1 样地分布情况

Fig. 1 Distribution of experimental sites

2.2　材料处理

将采集的叶片铺平后用扫描仪进行扫描,用图像分析软件 IPP(image pro-plus)计算叶片面积。然后将叶片置于烘箱,80℃烘 24 h 后,测量叶片干重(mg),以计算比叶面积($mm^2 \cdot mg^{-1}$)。每份随机抽取 30 颗果实,进行 5 个重复,共计 150 颗果实,剥出种子,将种子置于 80℃烘箱内 48 h,烘至恒重,称量种子干重(mg)。方法参照 C. Golodets[23]。

2.3　数据统计和分析

本研究共采集了 69 个物种的性状信息,每个物种出现的样方频率为 22.22%～74.07%。所选取的 69 个物种中,株高范围为 0.07～6.50 m;比叶面积范围为 2.673～32.853 $mm^2 \cdot mg^{-1}$;种子干重范围为 0.020～357.428 mg。

将 69 个物种的性状数据用 Z 得分数据转化法进行标准化处理,对照 Westoby 提出的 LHS 策略,分析比叶面积、植株高和种子干重的相关性(表 2),结果表明,延河流域内 69 个主要物种的功能性状间相关性不显著,其 P 值分别为 0.927、0.355、0.197,符合 LHS 策略的分析要求。

表 2　植株高、比叶面积和种子干重的 Pearson 相关性矩阵

Table 2　Pearson correlation matrix of plant height (H), specific leaf area (SLA) and seed mass (SM)

指标	植株高 H	比叶面积 SLA	种子干重 SM
H	1	−0.011	0.113
SLA		1	−0.157
SM			1

注:表中数值为比叶面积、植株高和种子干重的矩阵相关性系数。

在此基础上,根据同类离差平方和较小,类间离差平方和较大的原则,利用 3 个不同功能性状之间的差异采用 Ward 聚类法划分物种功能型。同时将所有的聚类结果输出,通过观察分类数与误差函数的碎石图的“拐点”,并结合组间聚类树状图(图 2),确定最优分类数及每组对应的详细物种。图中“拐点”对应分类数为 5,当分类数>5 时,各类别间误差函数差异较小;当分类数<5 时,各类别间距离迅速增大。

结合聚类树状图,最终把物种分为 5 个植物功能型。利用 SPSS 20.0 对分类后的各个植物功能型性状进行单因素方差(ANOVA)分析,利用 Post Hoc 进行多重比较,了解不同功能型植物的性状特征。图通过 Microsoft Excel 2010 和 SigmaPlot 12.5绘制。

3　结果与分析

3.1　植物功能型划分及其性状特征

根据图2,归纳各植物功能型的物种分类情况

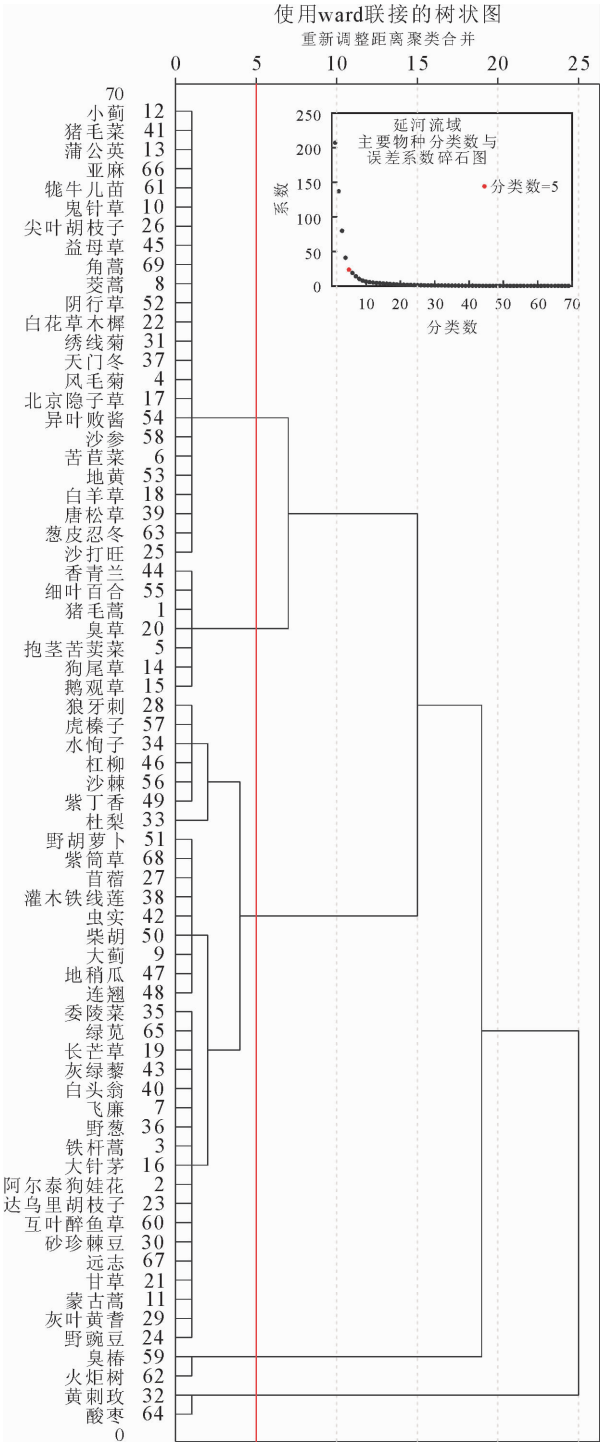


图 2　延河流域 69 个主要物种 Ward 聚类树状图

Fig. 2　Ward clustering analysis of 69 species in Yanhe River basin

(表 3),并比较各功能型植物的性状差异(图 3)。

功能型Ⅳ的植株高度最高且显著高于其他功能型($P \leqslant 0.05$),功能型Ⅴ的植株高度显著高于功能型Ⅱ,功能型Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的植株高度间无显著差异,功能型Ⅰ、Ⅲ、Ⅴ的植株高度间也无显著差异。功能型Ⅱ的比叶面积最大且显著高于其他功能型($P \leqslant 0.05$),功能型Ⅰ和功能型Ⅳ的比叶面积无显著差异且显著高于功能型Ⅲ和Ⅴ,功能型Ⅲ和功能型Ⅴ的比叶

面积无显著差异。种子干重中，功能型Ⅴ的种子干重最高显著高于其他功能型($P\leqslant 0.05$)，功能型Ⅳ显著高于功能型Ⅰ和Ⅱ，功能型Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ之间无显著差异，功能型Ⅲ和Ⅳ之间也无显著差异(图 3)。

表 3 延河流域主要物种依据层次聚类划分的 5 个功能型

Table 3 Five PFTs classified by clustering analysis in Yanhe River basin

植物功能型	生活型	物种 $N=69$（草本 $N=51$、木本 $N=18$）
PFT Ⅰ($N=24$)	草本($N=21$)	风毛菊(*Saussurea japonica*)、沙参(*Adenophora stricta*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、白花草木樨(*Melilotus albus*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)、苦苣菜(*Sonchus oleraceus*)、茭蒿(*Artemisia giraldii*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、小蓟(*Cirsium setosum*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、北京隐子草(*Cleistogenes hancei*)、唐松草(*Thalictrum aquilegifolium*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、益母草(*Leonurus artemisia*)、阴行草(*Siphonostegia chinensis*)、地黄(*Rehmannia glutinosa*)、异叶败酱(*Patrinia heterophylla*)、牻牛儿苗(*Erodium stephanianum*)、亚麻(*Linum usitatissimum*)、角蒿(*Incarvillea sinensis*)、天门冬(*Asparagus cochinchinensis*)
	木本($N=3$)	尖叶胡枝子(*Lespedeza juncea*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、葱皮忍冬(*Lonicera ferdinandii*)
PFT Ⅱ($N=7$)	草本	细叶百合(*Lilium pumilum*)、鹅观草(*Elymus kamoji*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、抱茎苦荬菜(*Ixeris sonchifolia*)、臭草(*Melica scabrosa*)、香青兰(*Dracocephalum moldavica*)、狗尾草(*Setaria viridis*)
PFT Ⅲ($N=34$)	草本($N=23$)	达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、远志(*Polygala tenuifolia*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)、蒙古蒿(*Artemisia mongolica*)、野豌豆(*Vicia sepium*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、飞廉(*Carduus nutans*)、大蓟(*Cirsium japonicum*)、大针茅(*Stipa grandis*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、苜蓿(*Medicago sativa*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、野葱(*Allium chrysanthum*)、白头翁(*Pulsatilla chinensis*)、虫实(*Corispermum hyssopifolium*)、灰绿藜(*Chenopodium glaucum*)、柴胡(*Bupleurum scorzonerifolium*)、绿苋(*Amaranthus viridis*)、紫筒草(*Stenosolenium saxatile*)、灰叶黄耆(*Astragalus discolor*)、砂珍棘豆(*Oxytropis racemosa*)、地稍瓜(*Cynanchum thesiodes*)、野胡萝卜(*Daucus carota*)
	木本($N=11$)	互叶醉鱼草(*Buddleja alternifolia*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、狼牙刺(*Sophora vicifolia*)、杠柳(*Periploca sepium*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、水栒子(*Cotoneaster multiflorus*)、灌木铁线莲(*Clematis fruticosa*)、连翘(*Forsythia suspensa*)、紫丁香(*Syringa oblata*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、杜梨(*Pyrus betulifolia*)
PFT Ⅳ($N=2$)	木本	臭椿(*Ailanthus altissima*)、火炬树(*Rhus typhina*)
PFT Ⅴ($N=2$)	木本	黄刺玫(*Rosa xanthina*)、酸枣(*Ziziphus jujuba*)

3.2 各功能型植物的环境适应策略及其流域分布

根据 LHS 策略划分，功能型Ⅰ的植物种有较小的植株高度和种子干重，较大的比叶面积(图 4、表 4)。该功能型植物生长速度快，但易受到放牧干扰等的影响，多生长在高干扰、高竞争、低压力的环境中，一般属于干扰型和竞争型策略，即可以通过快速生长完成生活史，而较低的种子质量可提高种子的扩散范围，从而提高生存几率。本研究中该功能型植物多为 1 年生或多年生草本(表 3)，在延河流域均有分布，主要作为群落的伴生种出现，且多出现在林缘或林窗。

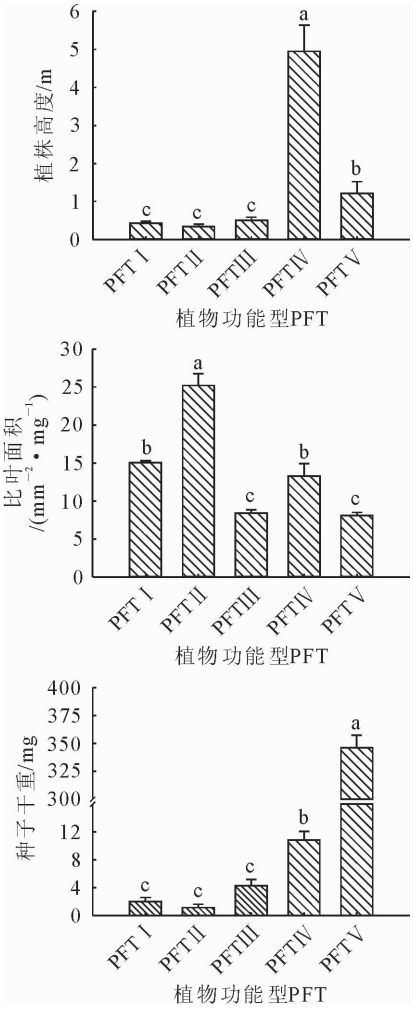
功能型Ⅱ的植物植株高度最低，种子干重最小，比叶面积最大(图 4、表 4)。功能型Ⅱ植物属于生态群落中典型的“r-策略植物”，一旦把握住机会就会迅速繁殖扩散，占领环境中的资源，但容易受到外界环境的干扰，在群落演替中后期易被淘汰。该功能型Ⅱ植物一般生长在高干扰、低竞争、低压力环境中。在延河流域，该功能型植物主要分布在流域中部的森林草原带上，且多分布在竞争压力较小的荒地或路旁。

表 4 延河流域植物功能型比较

Table 4 Comparisons between 5 PFTs in Yanhe River basin

植物功能型	功能性状	生长环境	植物策略	分 布
功能型Ⅰ	H 和 SM 较小，SLA 较大	高干扰、高竞争、低压力	干扰型和竞争型	延河流域
功能型Ⅱ	H 最低，SM 最小，SLA 最大	高干扰、低竞争、低压力	杂草型	延河流域中部
功能型Ⅲ	H 较低，SLA 较小，SM 较大	高胁迫、高竞争	耐胁迫型	延河流域的中部和北部
功能型Ⅳ	H 高，SLA 较小，SM 较大	高竞争、低压力	竞争型	延河流域南部
功能型Ⅴ	H 较高，SLA 小，SM 大	低胁迫、高竞争	竞争型和杂草型	延河流域中部

功能型Ⅲ物种的植株高度较低，比叶面积较小，种子干重较大(图 4、表 4)。一般生长在高胁迫、高竞争的环境中，属于耐胁迫型策略，该功能型植物主要是多年生草本和灌木，多分布于延河流域的中部和北部且成为该地区的优势物种。由于抗胁迫能力强，功能型Ⅲ物种是群落演替初期的主要物种。



注:不同字母代表 3 个功能性状在不同功能型间存在显著差异。

图 3　不同功能型之间植株高、比叶面积和种子干重的差异性比较

Fig. 3　Comparisons of height, specific leaf area and seed mass between different PFTs

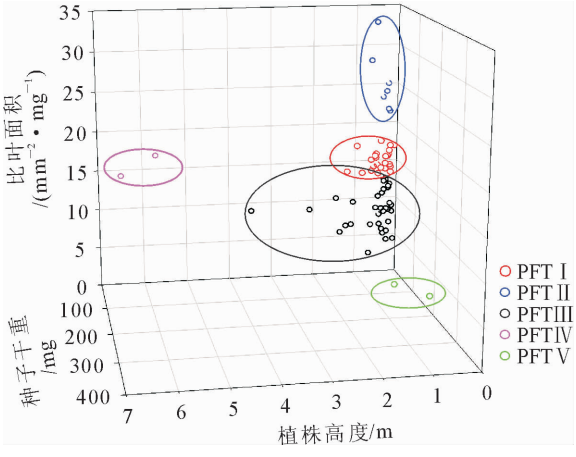


图 4　延河流域基于 LHS 策略的植物功能型划分

Fig. 4　The classification of PFTs based on LHS scheme in Yanhe River basin

功能型Ⅳ的植物植株高度高,比叶面积较小,种子干重较大(图 4、表 4)。该功能型植物生长于高竞争、低压力的环境中,属于竞争型策略。该功能型物种都是乔木,主要分布于水热条件较好的延河流域南部,并成为该区域的优势物种。

功能型Ⅴ的植物植株较高,比叶面积小,种子干重大(图 4、表 4)。一般生长在低胁迫、高竞争环境中。该功能型物种包括黄刺玫和酸枣 2 种灌木,作为灌木层的主要优势种,分布于流域中部的森林草原带。

在延河流域降雨量相对丰富、温度适宜的南部,植物群落的比叶面积较低,叶组织密度较高,种子大而重;延河流域北部群落植物的叶片较厚,地上生物量较少,地下根系分布深而广,种子小而轻,即多数以灌木或草本群落为主[24]。依据前人对延河流域物种分布的预测[24-25]和实地调查结果,功能型Ⅰ物种在延河流域均有分布;功能型Ⅱ物种分布广泛,主要分布在流域中部的森林草原带上;功能型Ⅲ物种主要分布在流域中部和北部;功能型Ⅳ物种主要分布在流域南部森林带和中部靠南的森林草原带;功能型Ⅴ的物种主要分布在流域的中部森林草原带中,且多生长在林下或林缘区域,与本试验结果基本吻合。

4　结论与讨论

根据植物的植株高、比叶面积和种子干重这 3 个植物性状,将延河流域的 69 个物种分成 5 个植物功能型,结合植物的分布区域[25],可以大致得出植物功能型的分类与物种分布相关[26],从南向北植物功能型依次为:植物功能型Ⅳ(植物功能型Ⅰ为伴生种)→植物功能型Ⅲ和植物功能型Ⅳ(植物功能型Ⅰ、Ⅱ、Ⅴ为伴生种)→植物功能型Ⅲ(植物功能型Ⅰ为伴生种)(表 5)。

表 5　延河流域植物分布

Table 5　Plant distribution in Yanhe River basin

植被区划	优势种	伴生种
森林带	植物功能型Ⅳ	植物功能型Ⅰ
森林草原带	植物功能型Ⅲ和Ⅳ	植物功能型Ⅰ、Ⅱ、Ⅴ
草原带	植物功能型Ⅲ	植物功能型Ⅰ

植物功能型随环境梯度的规律分布,体现了植物对环境变化的长期适应,对黄土丘陵区的植被恢复重建具有重要指导意义。一方面植物会选择适宜的环境进行生长繁殖[14],另一方面环境因子也会影响植物的物种组成和区域分布[27],不同功能型的植物分布在延河流域的不同区域,凸显了延河流域植物群落分布的多样性。因此,在实践中必须依据环境条件特征,选择与环境因子相匹配的具有相应环境策略与能力的功能型物种作为环境恢复的主要物种,制定合适的植被恢复方案。如果忽略植物功能

型分布与环境的响应关系，将分布在水分条件较好的流域南部的功能型Ⅳ植物人工栽植在水分条件较差的中部或北部地区，则会快速消耗土壤水分，引起土壤干化，林分退化。植物的生活史策略对于了解植物对环境变化所作出的反应和植物抗胁迫的方式有一定的帮助，一直都是生态学家的研究热点。M. Westoby[6]提出的 LHS 策略是以植物 3 个功能性状间的相互独立性为基础，本研究证实延河流域主要植物的植株高、比叶面积和种子干重这 3 个功能性状间是相互独立的，即 LHS 策略适用于延河流域，与施宇的研究结论不同[28]，可能与所选取的物种不同有关。

采用 LHS 策略从物种的性状方面揭示了延河流域主要物种的生活史策略，结合延河流域实际的物种分布状况，反应了延河流域群落演替中植被的更替顺序，对该区域的植被恢复重建有一定的指导意义。并得出了延河流域主要物种的所属植物功能型和生活史策略，但植物的生活史策略并非永恒不变的，同一物种在不同环境下，会表现出较大的性状差异，并采用不同的生活史策略以适应环境变化，从而更好地生长繁殖[29-31]。如果要继续深入研究植物的生活史策略，应该结合宏观气候环境及微气候环境进行研究，更全面、更精确地划分植物的功能型，从而预测延河流域的群落物种组成，为植被恢复作出进一步指导。

参考文献：

[1] 张景光，王新平，李新荣，等. 荒漠植物生活史对策研究进展与展望[J]. 中国沙漠，2005，25(3)：306-314.
ZHANG J G，WANG X P，LI X R，*et al*. Advances and prospect of researches on desert plant life history strategies [J]. Journal of Desert Research，2005，25(3)：306-314. (in Chinese)

[2] MACARTHUR R H，WILSON E O. The Theory of Island Biogeography[M]. Princeton：Princeton University Press，1967.

[3] GETZ W M. Metaphysiological and evolutionary dynamics of populations exploiting constant and interactive resources：r-K selection revisited [J]. Evolutionary Ecology，1993，7(3)：287-305.

[4] GRIME J P. Vegetation classification by reference to strategies [J]. Nature，1974，250(5461)：26-31.

[5] 刘志民，赵晓英，范世香. Grime 的植物对策思想和生态学研究理念[J]. 地球科学进展，2003，18(4)：603-608.
LIU Z M，ZHAO X Y，FAN S X. Grime's CSR model and his philosphy of ecological research [J]. Advance in Earth Sciences，2003，18(4)：603-608. (in Chinese)

[6] WESTOBY M. A leaf-height-seed (LHS) plant ecology strategy scheme [J]. Plant & Soil，1998，199(2)：213-227.

[7] PEREZ-HARGUINDEGUY N，DIAZ S，GARNIER E，*et al*. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide[J]. Australian Journal of Botany，2013，61(3)：167-234.

[8] 刘晓娟，马克平. 植物功能性状研究进展[J]. 中国科学：生命科学，2015，45(4)：325-339.
LIU X J，MA K P. Plant functional traits-concepts，applications and future directions [J]. Scientia Sinica Vitae，2015，45(4)：325-339. (in Chinese)

[9] 雷羚洁，孔德良，李晓明，等. 植物功能性状、功能多样性与生态系统功能：进展与展望[J]. 生物多样性，2016，24(8)：922-931.
LEI L J，KONG D L，LI X M，*et al*. Plant functional traits，functional diversity，and ecosystem functioning：current knowledge and perspectives [J]. Biodiversity Science，2016，24(8)：922-931. (in Chinese)

[10] GIVNISH T J. 1-Plant stems：biomechanical adaptation for energy capture and influence on species distributions [J]. Plant Stems Physiology & Functional Morphology，1995：3-49.

[11] ZHANG J，NIELSEN S E，MAO L，*et al*. Regional and historical factors supplement current climate in shaping global forest canopy height [J]. Journal of Ecology，2016，104(2)：469-478.

[12] THOMSON F J，MOLES A T，AULD T D，*et al*. Seed dispersal distance is more strongly correlated with plant height than with seed mass [J]. Journal of Ecology，2011，99(6)：1299-1307.

[13] WRIGHT I J，REICH P B，WESTOBY M，*et al*. The worldwide leaf economics spectrum [J]. Nature，2004，428(6985)：821-827.

[14] DÁ-AZ S，KATTGE J，CORNELISSEN J H，*et al*. The global spectrum of plant form and function [J]. Nature，2015，529(7585)：167-171.

[15] 安玉艳，梁宗锁. 植物应对干旱胁迫的阶段性策略[J]. 应用生态学报，2012，23(10)：2907-2915.
AN Y Y，LIANG Z S. Staged strategy of plants in response to drought stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2012，23(10)：2907-2915. (in Chinese)

[16] REICH P B. The evolution of plant functional variation：traits，spectra，and strategies [J]. International Journal of Plant Sciences，2003，164(S3)：143-164.

[17] 武高林，杜国祯. 植物种子大小与幼苗生长策略研究进展[J]. 应用生态学报，2008，19(1)：191-197.
WU G L，DU G Z. Relationships between seed size and seedling growth strategy of herbaceous plant：a review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2008，19(1)：191-197. (in Chinese)

[18] MOLES A T，WESTOBY M，ERIKSSON O. Seed size and plant strategy across the whole life cycle [J]. Oikos，2006，113(1)：91-105.

[19] 翁恩生，周广胜. 用于全球变化研究的中国植物功能型划分[J]. 植物生态学报，2005，29(1)：81-97.
WENG E S，ZHOU G S. Defining plant functional types in china for global change studies [J]. Acta Phytoecologica Sinica，2005，29(1)：81-97. (in Chinese)

[20] BOX E O. Plant functional types and climate at the global scale [J]. Journal of Vegetation Science，1996，7(3)：309-320.

[21] 翟辉，张海，邱梅，等. 黄土高原退耕坡地不同类型林分土壤生物学活性的研究[J]. 西北林学院学报，2016，31(4)：33-38.

ZHAI H,ZHANG H,QIU M,*et al*. Soil biological activity of different tree types on slope land converted from farmland in the Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University,2016,31(4):33-38. (in Chinese)

[22] 雷波,焦峰,王志杰,等. 延河流域生态环境脆弱性评价及其特征分析[J]. 西北林学院学报,2013,28(3):161-167.
LEI B,JIAO F,WANG Z J,*et al*. Eco-environment vulnerability evaluation and characteristics analysis in Yanhe River watershed[J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(3):161-167. (in Chinese)

[23] GOLODETS C,STERNBERG M,KIGEL J. A community-level test of the leaf-height-seed ecology strategy scheme in relation to grazing conditions [J]. Journal of Vegetation Science,2009,20(3):392-402.

[24] 温仲明,焦峰,焦菊英. 黄土丘陵区延河流域潜在植被分布预测与制图[J]. 应用生态学报,2008,19(9):1897-1904.
WEN Z M,JIAO F,JIAO J Y. Prediction and mapping of potential vegetation distribution in Yanhe River catchment in hilly area of Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2008,19(9):1897-1904. (in Chinese)

[25] 赫晓慧,温仲明,王金鑫. 基于 GAM 模型的延河流域主要草地物种空间分布及其与环境的关系[J]. 生态学杂志,2008,27(10):1718-1724.
HE X H,WEN Z M,WANG J X. Spatial distribution of major grassland species and its relations to environment in Yanhe River catchment based on generalized additive model [J]. Chinese Journal of Ecology,2008,27(10):1718-1724. (in Chinese)

[26] 杨涛,王得祥,周金星,等. 陕北黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落演替规律及物种多样性动态研究[J]. 西北林学院学报,2009,24(5):10-15.
YANG T,WANG D X,ZHOU J X,*et al*. Vegetation succession and species diversity dynamics of the plant communities in the Loess Hilly and Gully Region[J]. Journal of Northwest Forestry University,2009,24(5):10-15. (in Chinese)

[27] 罗先真,熊源新,夏欣,等. 环境因子对湖泊岛屿苔藓植物分布和物种组成的影响[J]. 生态学报,2017,37(7):2352-2359.
LUO X Z,XIONG Y X,XIA X,*et al*. Environmental variables affect species composition and distribution of Bryophytes [J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(7):2352-2359. (in Chinese)

[28] 施宇. 延河流域植物功能性状对环境变化的响应和植物适应策略研究[D]. 杨陵:西北农林科技大学,2012.

[29] 闫建成,梁存柱,付晓玥,等. 草原与荒漠一年生植物性状对降水变化的响应[J]. 草业学报,2013,22(1):68-76.
YAN J C,LIANG C Z,FU X Y,*et al*. The responses of annual plant traits to rainfall variation in steppe and desert regions [J]. Acta Prataculturae Sinica,2013,22(1):68-76. (in Chinese)

[30] 覃凤飞,沈益新,李兰海,等. 干旱胁迫对新疆三个优势牧草种的光合特性与水分利用效率的影响[J]. 草业学报,2016,25(10):86-94.
QIN F F,SHEN Y X,LI L H,*et al*. Effect of drought stress on the photosynthetic characteristics and water use efficiency of three dominant forage grasses in Sinkiang [J]. Acta Prataculturae Sinica,2016,25(10):86-94. (in Chinese)

[31] 王斌世,张荣. 半干旱区农田杂草的生活史对策研究[J]. 草业学报,2011,20(1):257-260.
WANG B S,ZHANG R. Study of life-history strategy of farmland weeds in semi-arid areas [J]. Acta Prataculturae Sinica,2011,20(1):257-260. (in Chinese)

(上接第 75 页)

[13] 王琪瑶,李云红,刘延坤,等. 不同间伐强度下长白落叶松人工林土壤总有机碳特征及其影响因素[J]. 森林工程,2018,34(1):1-5.
WANG Q Y,LI Y H,LIU Y K,*et al*. The characteristics and impact factors of different thinning intensity on soil total organic in the *Larix olgensis* plantation[J]. Forest Engineering,2018,34(1):1-5. (in Chinese)

[14] 郝丽,徐娟娟,翟园,等. 近 30 a 陕西省森林植被碳储量及其动态变化[J]. 干旱区研究,2017,34(5):1056-1062.
HAO L,XU J J,ZHAI Y,*et al*. Forest carbon storage and its dynamic change in Shaanxi Province in recent 30 years[J]. Arid Zone Research,2017,34(5):1056-1062. (in Chinese)

[15] 邵波,燕腾. 四川省森林植被碳储量及碳密度估算[J]. 西南林业大学学报,2017,37(2):179-183.
SHAO B,YAN T. Study on carbon storage and carbon density of forest in Sichuan Province[J]. Journal of Southwest Forestry University,2017,37(2):179-183. (in Chinese)

[16] 燕腾,彭一航,王效科,等. 西南 5 省市区森林植被碳储量及碳密度估算[J]. 西北林学院学报,2016,31(4):39-43.
TENG Y,PENG Y H,WANG X K,*et al*. Estimation on carbon reserve and carbon density of the forest vegetation in five Southwestern provinces[J]. Journal of Northwest Forestry University,2016,31(4):39-43. (in Chinese)

[17] 刘艳,孙向阳,范俊岗,等. 辽宁省森林植被碳储量及其动态变化[J]. 生态环境学报,2015,24(2):211-216.
LIU Y,SUN X Y,FAN J G,*et al*. Carbon storage and its dynamics of forest vegetations in Liaoning Province [J]. Ecology and Environmental Sciences,2015,24(2):211-216. (in Chinese)

[18] 贾松伟. 基于森林资源清查资料的河南省森林碳储量及其经济价值研究[J]. 湖北农业科学,2016,55(6):1612-1616.
JIA S W. Study on carbon storage of forest vegetation and its economic value in Henan Province based on continuous forest resources inventory[J]. Hubei Agricultural Sciences,2016,55(6):1612-1616. (in Chinese)

[19] 林维,崔晓阳. 地形因子对大兴安岭北端寒温带针叶林土壤有机碳储量的影响[J]. 森林工程,2017,33(3):1-6.
LIN W,CUI X Y. The influences of topographic factors on soil organic carbon storage in cool conifer forest in the North of Great Xing'an Mountain[J]. Forest Engineering,2017,33(3):1-6. (in Chinese)

[20] 王棣,佘雕,张帆,等. 森林生态系统碳储量研究进展[J]. 西北林学院学报,2014,29(2):85-91.
WANG L,SHE D,ZHANG F,*et al*. Avances in the researches of carbon storage of forest ecosystems[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,29(2):85-91. (in Chinese)