

文峪河上游河岸林群落环境梯度格局和演替过程

郭跃东¹, 郭晋平^{1,*}, 张芸香¹, 吉久昌^{1,2}

(1. 山西农业大学林学院, 山西太谷 030801; 2. 山西省太原市政府, 山西太原 030012)

摘要:以文峪河上游河岸林为研究对象,通过对群落建群种的 DCA 排序和物种关联分析进行生态种组划分,阐明了河岸林群落建群种各生态种组之间的生态演替功能差异,结合对样地和生态适应性功能组的 DCA 排序结果,分析了河岸林群落空间分布的环境梯度格局及其影响因素,基于以上分析,构建了研究地区河岸林群落演替过程,揭示了环境梯度格局对河岸林群落演替的控制作用。通过研究,文峪河上游河岸林群落生态适应性功能组比群落在排序空间上具有更好的分异性,采用生态适应性功能组更有利于分析群落的时空关系;研究地区河岸林群落 9 个建群种划分为阳性喜湿先锋型、阳性中生演替型、耐阴喜湿演替后期型和阳性中生逃避型 4 个生态种组;研究地区海拔梯度、河岸带坡度和河谷型共同决定了河岸林群落的分布格局,河岸带坡度和河谷型实际反映的是河岸带水文状况对河岸林群落时空格局的控制作用;根据生态适应性功能组和生态种组构建了研究地区河岸林群落演替模型,不同的海拔及其相应的河谷型具有明显不同的演替过程。

关键词:文峪河流域; 河岸林; 生态种组; 群落演替; 环境梯度

Environmental gradient analysis and succession process of riparian forest communities in upper reach of Wenyuhe watershed

GUO Yuedong¹, GUO Jinping^{1,*}, ZHANG Yunxiang¹, JI Jiuchang^{1,2}

1 College of Forestry of Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China

2 Taiyuan City Council, Taiyuan, Shanxi 030012, China

Abstract: This study was conducted in riparian forests of the upper reach of Wenyuhe watershed. Constructive tree species were classified into different ecological species groups by DCA ordination and inter-species association analysis. Environmental gradient of the riparian forest distribution patterns was analyzed using DCA ordination of the ecological function groups. Difference of the ecological succession function was also analyzed for the groups and their controlling effect on succession dynamics of environmental pattern was interpreted. Results showed: (1) The spatial ordination difference among ecological adaptive functional groups was larger than that among the riparian forest communities which indicated that ecological adaptive functional groups could be used to analyze community spatial pattern and dynamical succession of vegetations such as riparian forests with high habitat heterogeneity and strong seasonal fluctuation; (2) Nine dominant tree species were divided into four different ecological species groups: the sunny pioneer species group including *Salix ssp* and *Populus ussuriensis* Kom, the sunny meso-humid transitional species group including *Larix principis-rupprechtii* Mayr, *Betula paltiphylla* Suk. and *B. albo-sinensis* Burk., the shady hygrophilous climax species group consisting of *Picea meyeri* Rehd. and *P. wilsonii* Mast. and the sunny meso-humid avoiding species group consisting of *Pinus tabulaeformis* Carr. and *Quercus wutaishanica* Mayr. (3) Riparian forest distribution depended on site elevation, slope and river valley types, the latter two factors indicating the controlling effect of hydraulic regime on spatial and temporal patterns of the riparian forest communities. The strong avoiding group, strong invasion group, intermediate invasion group and weak invasion group distributed, respectively, mainly on the steep slopes or gentle high terraces with lower altitude, the valley floodplain with

基金项目:国家自然科学基金项目(30970480);教育部高等学校博士点基金(200801130002);山西省留学基金(2008079);山西农业大学科技创新基金(2009018)

收稿日期:2009-06-13; **修订日期:**2010-03-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jinguo@sohu.com

intermediate altitude, the steep slopes with higher altitude and low terrace with intermediate and higher altitude. The riparian forest pattern depends mainly on topographical factors, without significant effect of soil water content. Soil factors and hydrogeological disturbance may control vegetation pattern of riparian zone in a scale of watershed. (4) The succession series model of riparian forests was established according to the ecological adaptive functional groups and the ecological species groups. Different habitat has different succession process. Despite the species composition difference at first succession stage of riparian forest and upland forest the successional serial was in the same way. However, the successional process of riparian forests were more complicated than the upland forests. The present riparian forest was a subclimax affected by the local natural factors and human disturbance with its successional speed being lower than that of upland forests, which was in accordance with van der Valk's succession theory and heterogeneity theory of riparian zones.

Key Words: Wenyuhe watershed; riparian forest; ecological species group; succession dynamics; environmental gradient

群落是相互联系的种群的集合,群落的特征取决于组成群落的种群的特征及其相互关系^[1]。自然状态下群落内部的生态学过程和群落间相互作用通常受环境因素,空间因素和生物因素的影响^[2]。其中,植物种群和群落与环境的关系一直是植物生态学和地植物学研究的热点^[3-4],群落与环境的生态梯度关系还是建立植物群落环境解释模型和地理分布模型的基础^[5-6]。基于生态种组的概念,对不同生态属性的植物生态种组进行空间格局分析比较,可以揭示区域内植物种的生态地理空间分异特征和不同类型物种对环境适应的差别^[7]。在多个空间尺度上,植被格局对环境因子的变化有不同的响应^[8-9],这种响应是植物与环境长期协同进化的结果^[10-11]。因此,对植物群落环境梯度格局的研究是揭示群落分布格局环境控制机制的基础,也是进一步分析群落动态过程和机制的基础。

植物群落动态演替的基本动力取决于植物种群的替代关系。因此,植物对光照^[12-13]和土壤特性^[14-15]等生态因子的适应性、植物个体形态建成,如叶片^[16]和根系结构^[17]等方面的适应特性对演替过程的作用,已经成为揭示植物群落演替动力机制的重要途径^[18]。但是,在群落演替不同阶段,物种生理生态特性及其环境适应性也有很大变化^[19],表现为特定的可塑性,导致群落演替过程、格局和机制的复杂性^[20]。群落演替过程是时空异质性的关键驱动因素^[21],而生物在多尺度下对有限资源的竞争及其对异质空间的响应也反过来决定着演替动态。在高度异质、多变、干扰格局复杂的环境下,群落演替过程的多样性更高,而可预测性更差^[9,22]。河岸林是一类独特的森林群落,其生境高度异质性和多变性决定了群落特征和动态都有别于山地林^[23],揭示河岸林群落环境梯度格局及其成因机制、河岸林群落演替过程及其影响因素和控制机制,是深化河岸带结构功能关系的认识,提高河岸林群落动态预测能力所必需解决的问题。

本文以山西关帝山林区文峪河流域上游河岸林为研究对象,通过对物种的 DCA 排序和物种关联分析进行生态种组划分,结合对样地和生态适应性功能组的排序,分析河岸林群落空间分布的环境梯度格局及其影响因素,通过进一步分析河岸林群落建群种各生态种组之间的生态演替功能差异,揭示研究地区河岸林群落演替过程,阐明环境梯度格局与河岸林群落演替的控制关系。

1 研究地区概况及研究方法

1.1 研究地区概况

研究地区位于吕梁山脉中段关帝山林区的文峪河上游,地理坐标 111°21'—111°37'E, 37°45'—37°59'N。气候属于受季风影响和控制的暖温带大陆性山地气候,年平均气温 4.2℃,年平均降水量 822.6 mm。具体研究地点涉及庞泉沟国家级自然保护区及孝文山林场刁窝沟、木虎沟和苏家湾,河岸林沿文峪河上游主河道及各支流两侧河岸带分布,主要有温性针叶林,阔叶林,山地寒温性针叶林及一些灌丛群落。研究地区河岸带大部分遭受过不同程度的人为干扰,但随着保护区的建立和保护工作的加强也保存了一部分处于不同恢复阶段的河岸带群落,为河岸带植被生态学及其恢复重建研究提供了基础条件。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置及群落调查

根据研究内容需要,在研究地区 1630—2150m 海拔段河岸带设置河岸林群落典型样地,样地面积 20m × 20m。在每一个样地内,调查记录样地海拔、坡度、坡向、地形等环境指标,分别乔木层、灌木层和草本层进行群落学调查,乔木层主要调查胸径、树高、密度、胸高断面积和蓄积等指标,灌木层调查密度、盖度、高度和频度,草本层调查盖度和频度。共计调查 33 块样地,记录到 167 个植物种。样地概况见表 1。

表 1 河岸林样地概况表
Table 1 General character of the plots

样方号 Plot	海拔 Elevation	坡度 Slope	坡向 Aspect	河谷型 Valley form	样方号 Plot	海拔 Elevation	坡度 Slope	坡向 Aspect	河谷型 Valley form
0501	2131	23	42	V 形坡	0518	1928	0	167	U 形谷
0502	2121	25	92	V 形坡	0519	1909	32	184	U 形谷
0503	1630	0	251	U 形谷	0520	1775	0	169	阶地
0504	1712	35	337	V 形坡	0521	1971	15	339	V 形坡
0505	2018	0	164	U 形谷	0522	1975	42	144	V 形坡
0506	2001	0	123	U 形谷	0523	1920	0	131	U 形谷
0507	1978	0	168	U 形谷	0524	2050	12	12	U 形谷
0508	2099	33	121	V 形坡	0525	1968	10	25	U 形谷
0509	2101	14	5	V 形坡	0526	1950	10	28	U 形谷
0510	2090	24	128	阶地	0527	1850	8	349	阶地
0511	2052	0	349	U 形谷	0528	1834	0	104	U 形谷
0512	2100	6	297	U 形谷	0529	1721	32	0	V 形坡
0513	2112	42	154	V 形坡	0530	1670	5	6	U 形谷
0514	1924	16	56	阶地	0531	1729	3	345	U 形谷
0515	1882	0	78	阶地	0532	1975	0	92	U 形谷
0516	1850	0	84	阶地	0533	1970	0	321	阶地
0517	1945	15	315	阶地					

1.2.2 物种重要值计算

群落中物种重要值的计算分别层次进行,计算公式如下:

$$IV_c = \frac{(RD + RH + RS)}{3} \times 100 \quad (1)$$

$$IV_b = \frac{(RD + RC + RH + RF)}{4} \times 100 \quad (2)$$

$$IV_h = \frac{(RC + RF)}{2} \times 100 \quad (3)$$

其中, IV 为重要值,下标 c、b、h 分别代表乔木层、灌木层和草本层, RD 为相对密度, RH 为相对高度, RS 为相对显著度, RC 为相对盖度, RF 为相对频度。

1.2.3 群落排序及演替序列构建

在群落分类基础上^[24],以物种重要值为基础数据,采用 CANOCO 软件对样地进行空间排序以反映群落的生态功能适应性^[25],排序结果与主要乔木树种种间关联分析相结合对各群落建群种进行生态种组的划分,最后根据生态适应性功能组和生态种组的划分结果构建河岸林群落演替序列,分析群落演替过程。关联分析计算公式见(4)。

$$V = \frac{ad - bc}{\sqrt{(a+b)(a+c)(c+d)(b+d)}} \quad (4)$$

式中, a 是两个种均出现的样方数, b 和 c 是仅出现一个种的样方数, d 是两个种均不出现的样方数。

2 结果分析

2.1 河岸林群落 DCA 排序

群落样地按群落类型进行 DCA 排序,结果如图 1 所示,进一步将群落样地按生态适应性功能组进行 DCA

排序,结果如图 2 所示。采用 TWINSpan 分类的各群落类型在二维排序空间上没有明确的分布范围和界限,说明各群落类型之间的分异性较差。各生态适应性功能组在二维排序空间上有明确的分布空间,各生态适应性功能组之间的分异性比群落类型的分异性好得多。

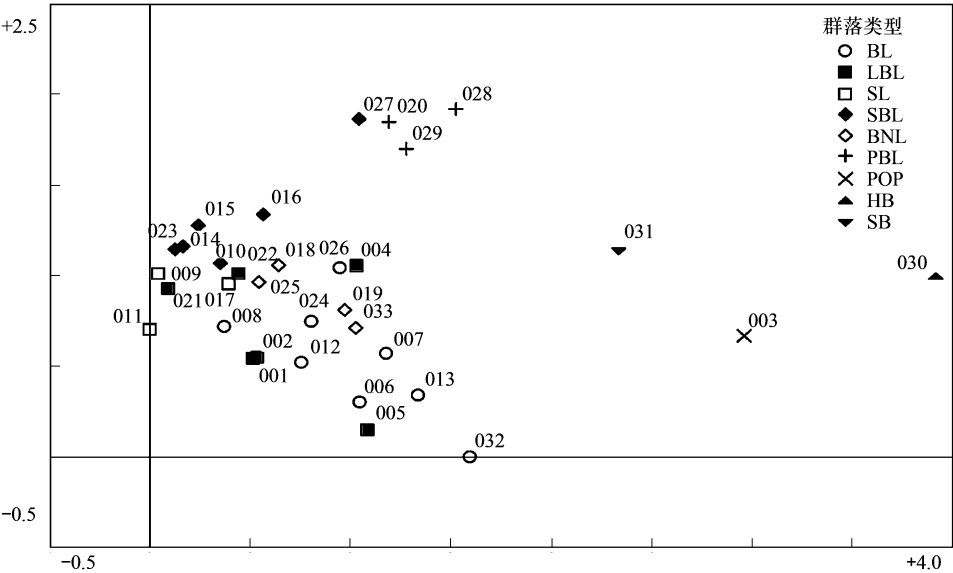


图 1 河岸林群落类型 DCA 排序图

Fig. 1 DCA ordination of community types for the riparian forests

* Community types; 群落类型; BL:阔叶混交林 Broad-leaved mixed stands; LBL:华北落叶松阔叶混交林 *Larix principis-rupprechtii* Mayr. + broad-leaved mixed stands; SL:云杉华北落叶松混交林 *Picea meyeri* Rehd. + *Larix principis-rupprechtii* mixed stands; SBL:云杉阔叶混交林 *P. meyeri* + Broad-leaved mixed stands; BNL:阔叶针叶混交林 Broad-leaved + needle-leaved mixed stands; PBL:油松阔叶混交林 *Pinus tabulaeformis* Carr. + Broad-leaved mixed stands; POP:青杨林 *Populus ussuriensis* Kom. stands; HB:沙棘灌丛 *Hippophae rhamnoides* Linn Bush; SB:柳树灌丛 *Salix* ssp Bush

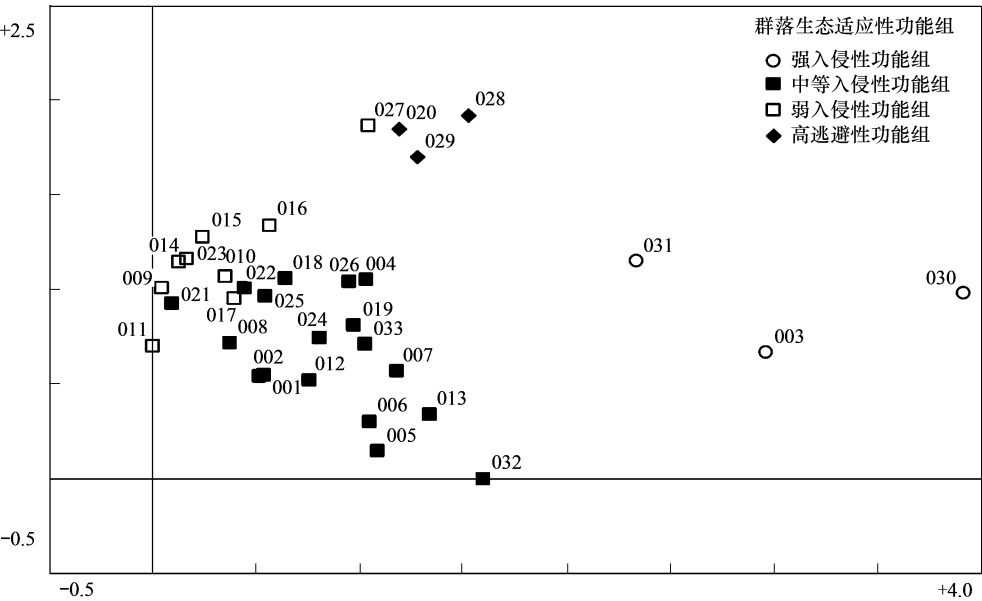


图 2 河岸林群落按生态适应性功能组 DCA 排序图

Fig. 2 DCA ordination of ecological functional groups for the riparian forests

2.2 群落主要乔木种生态种组划分

2.2.1 群落主要乔木种种间关联分析

采用公式(4)计算各群落主要乔木树种间关联系数,结果见表2。

表2 河岸林主要乔木树种间关联分析

Table 2 Inter-specific association coefficients of dominant trees of riparian forests communities

关联系数 Correlation coefficient	华北落叶松	油松	青杆	白杆	柳树	红桦	白桦	青杨	辽东栎
华北落叶松	1								
油松	-0.2797	1							
青杆	0.1224	0.0770	1						
白杆	0.2227	0.0959	-0.3958 *	1					
柳树	0.3217	-0.0959	-0.4539 **	0.4559 **	1				
红桦	0.3418 *	-0.3922 *	0.1359	-0.0376	0.1617	1			
白桦	0.4170 *	0.1490	0.3586 *	0.0143	-0.0143	0.1023	1		
青杨	0.1884	-0.0209	-0.3371	0.1519	0.1119	0.0082	0.0311	1	
辽东栎	-0.1208	0.1603	0.3858 *	0.0974	-0.4100 *	-0.0052	0.1992	-0.2731	1

* 表示差异显著即 $P < 0.05$, ** 表示差异极显著即 $P < 0.01$; 华北落叶松 *L. principis-rupprechtii* Mayr.、白桦 *B. paltiphylla* Suk.、红桦 *B. albo-sinensis* Burk.、青杨 *P. ussuriensis* Kom.、柳属的中华柳、周至柳、小叶柳中的一种或几种 *S. ssp.*、白杆 *P. meyeri* Rehd.、青杆 *P. wilsonii* Mast.、油松(*P. tabulaeformis* Carr.、辽东栎(*Quercus wutaishanica* Mayr.

由表2可以看出,落叶松与红桦、白桦呈现显著正关联;而与油松、辽东栎呈现一定程度负关联;柳树、青杨呈现一定程度的正关联;青杆和白杆呈现显著负关联。种间关联特性表明,乔木树种间生物学和生态学特性的相似性和相异性,是植物竞争能力及其可塑性的表现。

2.2.2 群落建群种 DCA 排序

采用 DCA 排序法对河岸林群落建群种进行物种排序,结果见图3。群落中各物种在排序空间上占有一定的位置。

2.2.3 群落建群种的生态种组划分

根据图3中河岸林各建群种在排序空间上的位置,结合各建群种生物学和生态学特性及上述种间关联结果,可将9个树种划分为4个生态种组。

(1) 阳性喜湿先锋型 由河杨和柳树组成,具有喜阳喜湿特性,入侵河岸带立地的能力较强,常成为河岸林群落演替的先锋树种。

(2) 阳性中生演替型 由华北落叶松、白桦和红桦组成,属于阳性中生性树种,侵入河岸带潮湿生境的能力中等,常继先锋性树种之后出现。

(3) 耐阴性喜湿演替后期型 包括青杆和白杆,耐阴性、喜湿性较强,林下更新能力较强,属于研究地区河岸林群落演替后期种。

(4) 阳性中生逃避型 包括油松和辽东栎,属于暖温带落叶阔叶林的组成树种和替代种,强阳性,不耐水湿,偶见于低海拔排水良好的中生性河岸带,在较高海拔属于典型逃避种。

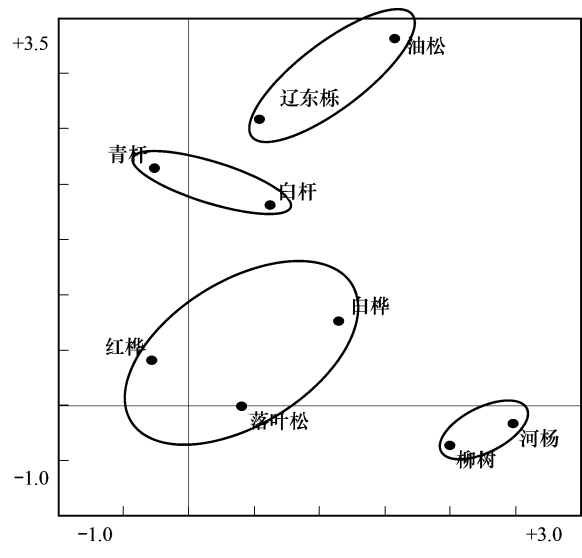


图3 河岸林建群种生态种组 DCA 排序图

Fig. 3 DCA ordination of ecological species groups for the riparian forest edifier

2.3 河岸林群落环境梯度格局分析

在河岸林群落 DCA 排序图(图 1)中,第一排序轴反映群落沿海拔梯度的格局,从左到右,群落分布的海拔逐渐降低;第二排序轴反映群落沿着由坡向和坡度共同决定的湿度和温度梯度格局。

为了进一步验证这种分布梯度格局,对群落进行 DCCA 排序,并对排序值和环境因子间的相关性进行分析,结果见表 3。由表可知,第一排序轴与海拔的相关性最强,而河岸带坡度与第二排序轴的相关性最强,分别对第一二排序轴与海拔和河岸带坡度两个环境因子做散点图,见图 4 和图 5。由图 4 和图 5 可见,河岸林群落格局的分布主要取决于两个环境因子的梯度格局,第一轴与海拔显著负相关,第二轴与河岸带坡度显著负相关,与 DCA 排序分析结果一致。

表 3 环境因子与排序轴之间的相关性分析

Table 3 The correlation analysis between ordination axis and environment factors

相关系数 Correlation coefficient	排序轴 Ordination axis			
	AX1	AX2	AX3	AX4
海拔 ELE	-0.7940 **	-0.0657	0.2241	0.0493
坡度 SLO	-0.2281	-0.2859	-0.4900 **	0.0005
坡向 ASP	0.0404	0.3033	-0.3748 *	0.0603
河岸带坡度 SLOB	-0.3078	-0.4104 *	0.2290	-0.3409 *
河岸带坡向 ASPRB	-0.0386	-0.0111	0.0294	0.5271 **
枯落物厚度 LITTER	-0.4110 *	-0.2148	0.2213	0.1907
河流宽度 RBAND	0.3231	-0.4100	-0.0268	-0.3118

* 表示差异显著即 $P < 0.05$, ** 表示差异极显著即 $P < 0.01$

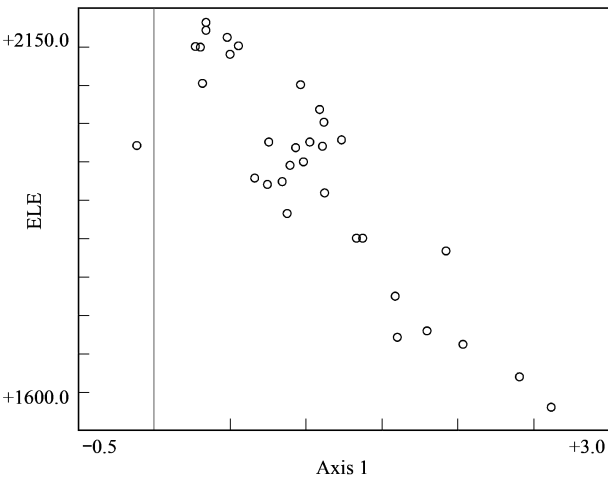


图 4 排序轴 1 与海拔梯度相关性

Fig. 4 Correlation between elevation and axis 1

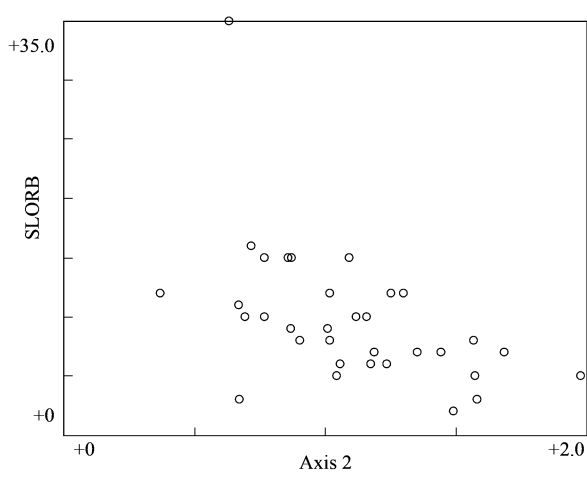


图 5 排序轴 2 与河岸带坡度相关性

Fig. 5 Correlation between slope and axis 2

2.4 河岸林群落演替序列构建

群落在排序图上的位置可以反映群落的演替关系^[25],群落生态适应性功能组的排序结果能更好地反映这种关系,生态种组的排序结果也能反映群落之间的替代关系^[26],则综合两者提供的信息构建河岸林群落的演替序列,结果如图 6 所示。

图 6 中,青杨在河岸带上具有较高的繁殖和生存适应性,其生长和成林速度快,成林后结构相对简单,有利于桦树的侵入,从而形成杨桦混交林,而且二者也可同期发生,形成同生群,建立混交林群落。青杨和桦树在林下自然更新不良,而华北落叶松能在阳性阔叶林下更新,群落优势种逐渐被华北落叶松取代。在华北落叶松纯林或以华北落叶松为主的针阔混交林下,更适于耐荫性较强的云杉(青杆或白杆)更新,群落趋于以云杉为优势种的异龄林。

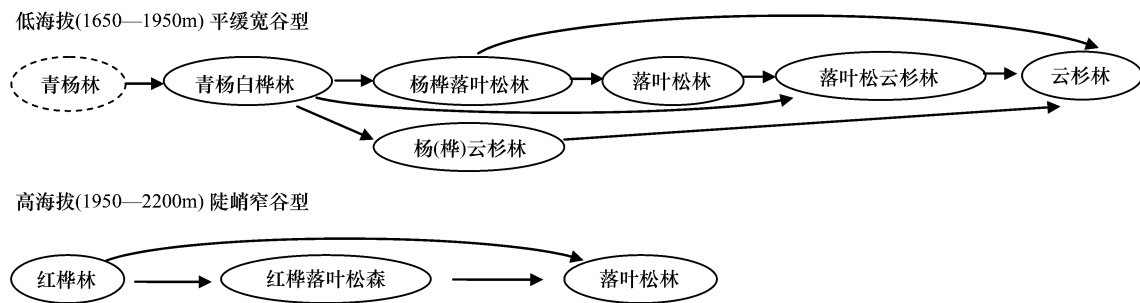


图6 文峪河流域上游河岸林群落演替模式

Fig. 6 Succession model of riparian forests in the upper reaches of Wenyuhe watershed

3 讨论

3.1 河岸林分布环境梯度分析

地形是导致山地各种生态现象和过程发生变化的根本性因素^[27],其中海拔是控制物种分布格局的首要因子^[28-29],在华北和黄土高原地区山地的表现更显著^[30-32]。有研究认为河岸带也表现为相同趋势^[33],但对三峡地区河岸带的研究中,河岸带植物群落的分布更多地取决于土壤湿度梯度格局^[34],甚至土壤质地和一定土层深度范围内的土壤碳含量也是重要的影响因子^[35]。本研究的范围局限在流域上游,受河岸带宽度的限制,土壤湿度的空间变异尺度较小,本研究的取样方式不足以充分表现土壤湿度梯度格局,因而表现为群落分布受海拔的影响很显著,而土壤湿度梯度格局的控制作用不明显。

河岸带坡度成为影响河岸林群落分布格局的另一个重要因子。河岸带地形受季节性水文过程作用,使河流水文过程成为影响河岸带植被分布格局的主要因子^[36-38],表现为河岸带高度等地形因子与群落丰富度呈明显负相关^[39]。有学者进而提出河谷地形嵌套等级景观模型来解释河岸带植被格局的成因^[40]。但一些研究结果仍是支持土壤特性为主要因子而河流水文是次要因子^[35]。Henry 早先就曾同时采用地形和土壤因子来分析植被格局成因,把地形、土壤、植被作为生态系统单元的判定者进行生态系统单元分类^[41]。本研究中,较高海拔 V 形河谷的河岸带坡地由落叶松、红桦占据, U 形谷河岸带滩地由青杨和白桦占据,低阶地则由云杉占据;较低海拔宽河谷冲积沙性河岸带由油松占据。河岸林分布与河谷类型之间的关系说明,植被、地形和河流水文过程共同作用,影响着河岸带植被组成结构及其空间分布格局。实际上,河岸带地形坡度与河流水文过程存在着内在的交互作用,这使得它们之间的关系更加复杂。因此,地形、土壤、植被及其与水文作为干扰因子的耦合机制可能成为阐明河岸带植被格局成因机制的概念模型(图 7)。对于特定的流域来说,河流水文干扰成为联系地形、土壤和植被的核心过程。

3.2 河岸林演替过程的特点

河岸林的演替特点应该表现在它与山地林的差异上。山地林主要由演替后期树种组成,而河岸林主要由耐干扰的演替前期树种组成^[42]。但河岸林的物种组成仍受多种因素的制约,如区域气候、种源、水文学、地形学和干扰状态^[6,9],物种生态对策与洪水动态的耦合、环境开放性和繁殖体的传播特性等是也群落演替动态的决定因素^[11],且河岸林群落沿海拔梯度分布的分异性较差而连续性较高^[43]。在本研究中,通过对河岸林群落建群种进行生态种组划分,对河岸林群落进行生态适应性功能组划分,较好地阐释了河岸林群落的演替过程,河岸林与山地林群落物种组成虽有显著差异^[24],表

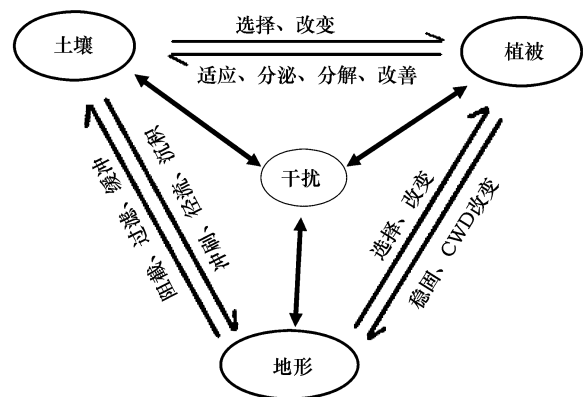


图7 河岸带植被格局成因机制概念模式

Fig. 7 Coupling mechanism of vegetation, soil and landform and its association with disturbance process

现为两者的演替方向和演替序列差别不大,但在演替前期的一些阶段建群种有明显不同,而演替后期阶段物种则较一致。如,山地林的演替前期树种主要为山杨,而河岸林高海拔段的演替前期树种为红桦,低海拔段则为青杨和柳树,且河岸带的干扰相对更频繁,河岸林群落的演替进程更显缓慢。河岸带环境异质性强,地形过程和水文过程复杂,使河岸林群落的进展和退化过程交织并存,延缓了群落演替的总体进程。河岸生境中物种存在时间的长短将取决于生境的变化,当生境处于特定的自然和人为干扰格局控制下的动态稳定状态时,河岸林群落将形成与该特殊生境和干扰格局相适应的亚顶极群落^[23]。该亚顶极群落可能是由某一生态种组控制形成的特定演替阶段的群落,但不同生态种组或同一生态种组的物种在高度异质和多变的河岸带上组成复杂共优群落的可能性更大,而演替进程则更缓慢,演替各阶段的分异性较差而连续性更高,演替轨迹也更复杂多变,并可能长期处于某一亚顶极状态。河岸带作为湿地生态系统的一种重要类型,其生境的异质性和环境干扰体系的复杂性^[44]使其呈现与山地林截然不同的特点,如 Van der Valk/Gleasonian 的湿地演替理论所预测^[45],河岸林演替也将处于某一均匀生境主导的优势群落或多种过渡生境主导的共优群落。

4 结论

(1) 山西关帝林区文峪河上游河岸林群落生态适应性功能组比群落在排序空间上具有更好的分异性,对于河岸林这类生境异质性强、波动性大的群落来说,对生态适应性功能组进行排序更有利于分析群落的空间格局,构建群落演替关系。

(2) 研究地区河岸林群落 9 个建群种划分为阳性喜湿先锋型、阳性中生演替型、耐阴喜湿演替后期型和阳性中生逃避型 4 个生态种组。

(3) 研究地区海拔梯度、河岸带坡度和河谷型共同决定了河岸林群落的分布格局,河岸带坡度和河谷型实际反映的是河岸带水文状况的控制作用。

(4) 根据生态适应性功能组和生态种组构建了研究地区河岸林群落演替模型,不同的海拔及其相应的河谷型具有明显不同的演替过程。

References:

- [1] Shi Z M, Cheng R M, Liu S R, Jiang Y X, Chen B J. Study on species diversity of plant community in Baotianman. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(6):17-23.
- [2] Xin X P, Gao Q, Li Z Q, Yang Z Y. Partitioning the spatial and environmental variations of plant community structure of Alkaline grassland on Songnen plain. *Acta Botanica Sinica*, 1999, 41(7):775-781.
- [3] Li S Q, Li B, Zhang J T. Community pattern analysis of a subalpine meadow community based on DCA in Yunding Mountain, Shanxi. *Acta Prataculturae Sinica*, 2006, 15(6):44-48.
- [4] Jiang H, Huang J H, Chen L Z. DCA ordination, quantitative classification and environmental interpretation of plant community in Dongling Mountain. *Acta Botanica Sinica*, 1994, 36(7):539-551.
- [5] Jiang H. DCA ordination, environment interpretation and geographical distribution model of spruce and fir plant community in northwest Sichuan and south Gansu. *Acta Phytocologica Sinica*, 1994, 18(3):209-218.
- [6] Shalfroth P B, Stromberg J C, Patten D T. Riparian vegetation responses to altered disturbance and stress regimes. *Ecological Applications*, 2002, 12:107-123.
- [7] Shen Z H, Zhang X S, Jin Y X. An analysis of the topographical pattern of the chief woody species at Dalaoling mountain in the three gorges region. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5):581-589.
- [8] Shen Z H, Zhang X S. the spatial pattern and topographic interpretation of the forest vegetation at Dalaoling region in the three gorge. *Acta Botanical Sinica*, 2000, 42(10):1089-1095.
- [9] Cooper D J, Andersen D C, Chimner R A. Multiple pathways for woody plant establishment on floodplain at local to regional evidence. *Journal of Ecology*, 2003, 91:182-196.
- [10] Fang Y, Zhang Y M, Pan B R. Grassland types with environment relations in middle zone of northern slope of Tianshan Mountains. *Arid Land Geography*, 2006, 29(2):237-242.
- [11] David M R, Patricia M H, Karen J E, Susan M C, Juliet C S, Steven P K, Petr P, Richard J H. Riparian vegetation: degradation, alien plant invasions and restoration prospects. *Diversity and Distribution*, 2007, 13:126-139.
- [12] Wang A M, Zu Y G. Photosynthetic characteristics of birch during different succession stages in Great Xingan Mountain. *Journal of Jilin*

- Agricultural University, 2005, 27(2):190-193.
- [13] An H, Shangguan Z P. Photosynthetic characteristics of dominant plant species at different successional stage of vegetation on Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(6):1175-1180.
- [14] Wang G H. Plant traits and soil chemical variables during a secondary vegetation succession in abandoned fields in Loess Plateau. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(8):990-998.
- [15] Chen G, Sun G R, Peng Y Z, Ma D H, Yue Z H, Na S H, Yan X F. Effect of nitrogen accumulation in *Puccinellia tenuiflora* grassland on the succession of vegetation in Songnen alkaline grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5):2031-2041.
- [16] Shi G R, Tang Y, Zhang Z. Leaf anatomy of dominant plant species in the successional communities of Xiangshan Mountain, Huabei, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2006, 30(2):314-322.
- [17] Li P, Zhao Z, Li Z B, Wang N J. Advances on the interactional mechanism between Root System and Ecoenvironment. *Journal of Northwest Forest University*, 2002, 17(2):26-32.
- [18] Mu C C. Succession of *Larix olgensis* and *Betula platyphlla*-marsh ecotone communities in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11):1813-1819.
- [19] Li Q K, Ma K P. Advances in plant succession ecophysiology. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26 (sup): 9-19.
- [20] Qiu Y, Zhang Y, Han J, Wang J, Meng Q H. Spatiotemporal pattern of ecological cropland conversion and vegetation succession: a review. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(11):2002-2009.
- [21] Monica G T. Landscape ecology: what is the state of the science?. *Annual Review of Ecology. Evolution and Systematics*. 2005, 36:319-344.
- [22] Zeng F P, Peng W X, Song T Q, Wang K L, Wu H Y. Changes in vegetation after 22 years' natural restoration in the karst disturbed area in northwest Guangxi. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2):5110-5119.
- [23] Naiman R J, Roben E B, Bisson P A. Riparian ecology and management in the Pacific coastal rain forest. *Bioscience*, 2000, (1): 996-1011.
- [24] Ji J C, Guo Y D, Guo J P, Zhang Y X. Community categories and its ecological adaption characteristics of riparian forest in the upper reach of Wenyuhe watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3):1587-1595.
- [25] Zhang J T. *Quantitative Ecology*. Beijing: Science Press, 2004: 336-338.
- [26] Li Y D, Xu H, Chen D X, Luo T S, Mo J H, Luo W, Chen H Q, Jiang Z L. Discussing on the ecological species groups and functional groups division based on the interspecific association — a case study on the arbor layer data in tropical lowland rain forest of Jianfenling, Hainan Island, China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(4):9-16.
- [27] Fang J Y, Shen Z H, Cui H T. Ecological characteristics of mountain and research issues of mountain ecology. *Biodiversity Science*, 2004, 12(1):10-19.
- [28] Hao Z Q, Guo S L, Ye J. Canonical correspondence analysis on relationship of woody plants with their environment on the northern slope of Changbai Mountain. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(6):733-741.
- [29] Xu G C, Kang M Y, Ma M, Liu Q R, Zhu Y, Wang H, Guo W W, Xu D. the relationship between herbaceous vegetation and environment in middle reach of Halaqingou stream valley, Mt. Daqingshan, Inner Mongolia. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(4):393-399.
- [30] Tang J L, Liu Y L, Li X B, Duan Y G. Analysis on the relationship between environmental gradient and plant communities in Guandi Mountains, Shanxi Province. *Journal of Beijing Forestry University*, 1995, 7(4):86-93.
- [31] Zhang F, Zhang J T, Zhang F. Pattern of forest vegetation and its environmental interpretation in Zhuweigou, Lishan Mountain Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3):421-427.
- [32] Liu Q F, Kang M Y, Liu Q R. Environmental gradient analysis and species group division of tree species distribution in eastern Zhongtiao Mountain. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(11):1306-1311.
- [33] Zhou R, Hu Y Z, Xiong Y, Wang H, Ge J P, Bi X L. Interpreting ecological land cover pattern for the riparian zone of the upper Minjiang River, China. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(1):2-10.
- [34] Jiang M X, Deng H B, Cai Q H. Characteristics, classification and ordination of riparian plant communities in the Three-Gorges areas. *Journal of Forest Research*, 2002, 13(2):111-114.
- [35] Maingi J K, Marsh S E. Composition, structure and regeneration patterns in a gallery forest along the Tana river near Bura, Kenya. *Forest Ecology and Management*, 2006, 236 (2):211-228.
- [36] Daniel A E, Douglas H B. Tree species-richness and topographic complexity along the riparian edge of the Potomac River. *Forest Ecology and Management*, 1998, 109:305-314.
- [37] Suzuki W, Osumi K, Masaki T, Takahashi K, Daimaru H, Hoshizaki K. disturbance regimes and community structure of a riparian and an adjacent terrace stand in the Kanumazawa riparian research forest, northern Japan. *Forest Ecology and Management*, 2002, 157 (1):285-301.
- [38] Jason E B, Dixon W M. Watershed in layers: landform influence on tree growth and understory species richness. *Journal of Vegetation Science*, 2008, 19:885-892.
- [39] Jiang M X, Deng H B, Tang T, Cai Q H. Spatial pattern of species richness in plant community along riparian zone in Xiangxi River watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(5):629-635.

- [40] Goebel P C, Pregitzer K S, Palik B J. Landscape hierarchies influence riparian ground-flora communities in Wisconsin, USA, P C. Forest Ecology and Management, 2006, 230 (1): 43-54.
- [41] Henry M W, Browning A S, Simon S A, Fouts P E. An unconventional approach to ecosystem unit classification in western North Carolina, USA. Forest Ecology and Management, 1999, 114 (2): 405-420.
- [42] Sugden-Newbery A, Turner M G. Forest Community Composition in Riparian and Upland Sites in the Northern Highlands Lake District. Wisconsin, USA: Ecological Society of American, 2004.
- [43] Mu C C, Ni Z Y, Li D, Sun X X, Chen J L. Distribution patterns of woody plant diversity in stream riparian forests along an altitudinal gradient in Changbai Mountains. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(5): 943-950.
- [44] Peng S L, Ren H, Zhang Q M. Theories and techniques of degraded wetland ecosystem restoration. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14 (11): 2026-2030.
- [45] van der Valk A G. Succession theory and wetland restoration//McComb A J, Davis J A eds. Proceedings of INTECOL' V International Wetland Conference. Adelaide, Australia: Gleneagles Press, 1999: 657-667.

参考文献:

- [1] 史作民, 程瑞梅, 刘世荣, 蒋有绪, 陈宝金. 宝天曼植物群落物种多样性研究. 林业科学, 2002, 38(6): 17-23.
- [2] 辛晓平, 高琼, 李镇清, 杨正宇. 松嫩平原碱化草地植物群落分布的空间和环境因素分析. 植物科学, 1999, 41(7): 775-781.
- [3] 李素清, 李斌, 张金屯. 基于 DCA-TTLQV 的云顶山亚高山草甸群落格局分析. 草业科学, 2006, 15(6): 44-48.
- [4] 江洪, 黄建辉, 陈灵芝. 东灵山植物群落的排序数量分类与环境解释. 植物学报, 1994, 36(7): 539-551.
- [5] 江洪. 川西北甘南云冷杉林的 DCA 排序环境解释和地理分布模型的研究. 植物生态学报, 1994, 18(3): 209-218.
- [7] 沈泽昊, 张新时, 金义兴. 三峡大老岭地区主要木本植物分布的地形格局. 植物生态学报, 2000a, 24(5): 581-589.
- [8] 沈泽昊, 张新时. 三峡大老岭地区森林植被的空间格局分析及其地形解释. 植物学报, 2000b, 42(10): 1089-1095.
- [10] 冯纛, 张元明, 潘伯荣. 天山北坡中段草地类型的生态梯度组合格局与环境分析研究. 干旱区地理, 2006, 29(2): 237-242.
- [12] 王爱民, 祖元刚. 大兴安岭不同演替阶段白桦种群光合生理生态特征. 吉林农业大学学报, 2005, 27(2): 190-193.
- [13] 安慧, 上官周平. 黄土高原植被不同演替阶段优势种的光合生理特性. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1175-1180.
- [15] 陈刚, 孙国荣, 彭永臻, 马东辉, 岳中辉, 那守海, 阎秀峰. 星星草(*Puccinellia tenuiflora*)人工草地氮素积累对松嫩盐碱草地植被演替的影响. 生态学报, 2008, 28(5): 2031-2041.
- [16] 史刚荣, 汤盈, 张铮. 淮北相山恢复演替群落优势树种叶片的生态解剖. 植物生态学报, 2006, 30(2): 314-322.
- [17] 李鹏, 赵忠, 李占斌, 王乃江. 植被根系与生态环境相互作用机制研究进展. 西北林学院学报, 2002, 17(2): 26-32.
- [18] 牟长城. 长白山落叶松和白桦-沼泽生态交错带群落演替规律研究. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1813-1819.
- [19] 李庆康, 马克平. 植物群落演替过程中植物生理生态学特性及其主要环境因子的变化. 植物生态学报, 2002, 26(增刊): 9-19.
- [20] 邱扬, 张英, 韩静, 孟庆华. 生态退耕与植被演替的时空格局. 生态学杂志, 2008, 27(11): 2002-2009.
- [22] 曾馥平, 彭晚霞, 宋同清, 王克林, 吴海勇. 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复 22 年后群落特征. 生态学报, 2007, 27(2): 5110-5119.
- [24] 吉久昌, 郭跃东, 郭晋平, 张芸香. 文峪河上游河岸林群落类型及其生态适应性. 生态学报, 2009, 29(3): 1587-1595.
- [25] 张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版社, 2004: 336-338.
- [26] 李意德, 许涵, 陈德祥, 骆士寿, 莫锦华, 罗文, 陈焕强, 蒋忠亮. 从植物种群间联结性探讨生态种组与功能群划分——以尖峰岭热带低地雨林乔木层数据为例. 林业科学, 2007, 43(4): 9-16.
- [27] 方精云, 沈泽昊, 崔海亭. 试论山地的生态特征及山地生态学的研究内容. 生物多样性, 2004, 12(1): 10-19.
- [28] 郝占庆, 郭水良, 叶吉. 长白山北坡木本植物分布与环境关系的典范对应分析. 植物生态学报, 2003, 27(6): 733-741.
- [29] 徐广才, 康慕滨, 马敏, 刘全儒, 朱源, 王好, 郭雯雯, 徐丹. 内蒙古大青山哈拉沁流域中游草本植被与环境的关系. 山地学报, 2007, 25(4): 393-399.
- [30] 唐季林, 刘宇林, 李新彬, 段永刚. 关帝山植物群落与环境梯度分析. 北京林业大学学报, 1995, 17(4): 86-93.
- [31] 张峰, 张金屯, 张峰. 历山自然保护区猪尾沟森林群落植被格局及环境解释. 生态学报, 2003, 23(3): 421-427.
- [32] 刘秋锋, 康慕滨, 刘全儒. 中条山东段森林乔木树种分布的环境梯度分析与种组划分. 生态学杂志, 2006, 25(11): 1306-1311.
- [33] 周睿, 胡玉喆, 熊颖, 王辉, 葛剑平, 毕晓丽. 岷江上游河岸带土地覆盖格局及其生态学解释. 植物生态学报, 2007, 31(1): 2-10.
- [39] 江明喜, 邓红兵, 唐涛, 蔡庆华. 香溪河流域河岸带植物群落物种丰富度格局. 生态学报, 2002, 22(5): 629-635.
- [43] 牟长城, 倪志英, 李东, 孙晓新, 陈加利. 长白山溪流河岸带森林木本植物多样性沿海拔梯度分布规律. 应用生态学报, 2007, 18(5): 943-950.
- [44] 彭少麟, 任海, 张倩媚. 湿地生态系统恢复的一些理论问题. 应用生态学报, 2003, 14(11): 2026-2030.