

空间显式模型模拟河流岸边带植被 在水库运行作用下的演替

叶 飞¹, 陈求稳^{1,*}, 吴世勇², 蔡德所³, 王洪梅²

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 二滩水电开发有限责任公司, 成都 610021;
3. 广西壮族自治区水利厅, 南宁 530023)

摘要: 岸边带是水-陆之间的过渡和缓冲地带, 是河流生态系统的重要组成部分。岸边带对拦截径流中的固体颗粒、吸收营养盐、减少入河污染负荷有重要作用。受河流水位季节性波动的影响, 岸边带生态系统的变化非常剧烈, 而当水库等水工建筑的运行剧烈改变河流的水文情势时, 水库下游的岸边带生态系统将受到长期的累积性影响。因此, 研究复式河道岸边带植被动态对于受损河流生态修复以及河流开发运行的生态环境影响规避具有重要意义。通过原位样方观测和室内水槽模拟试验, 开发了岸边带植被演替模型, 该模型耦合了全局基于连续性模式的水动力模块和局部基于元胞自动机模式的植被演替模块, 并以漓江中游的一段复式河道为例, 通过模拟水库运行前后长序列的水文情势变化和 3 种岸边带植物(刺果酸模、水蓼和益母草)的生长演替, 分析了为满足旅游航道需求上游水库补水运行对下游岸边带植被的影响。

关键词: 岸边带植被; 水库运行; 元胞自动机; 模型耦合

文章编号: 1000-0933(2008)06-2604-10 中图分类号: Q142, Q178, Q948 文献标识码: A

Spatially-explicit modelling of riparian vegetation dynamics under reservoir operations

YE Fei¹, CHEN Qiu-Wen^{1,*}, WU Shi-Yong², CAI De-Suo³, WANG Hong-Mei²

1 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Ertan Hydropower Development Cooperation, Chengdu 610021, China

3 Water Resources Department of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530023, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2604 ~ 2613.

Abstract: Riparian zones are important to the interception of diffusive pollutants and the rehabilitation of aquatic ecosystems. Due to the fluctuations of the water levels, riparian ecosystems usually have strong dynamic behaviors. This study focuses on the understanding of the vegetation dynamics and successions of riparian zones of compound channels when the flow regimes are fundamentally modified by river regulations such as reservoir operations. The research developed an integrated riparian vegetation model which couples the global continuum formulations of hydrodynamics with the local cellular automata of vegetation evolution. The model was then applied to a compound channel of Lijiang River in the Southwest China, which has been affected by the flow regulations for navigation purpose. Through the simulations, the previous changes of the riparian vegetations were analyzed and their future developments under the new flow regulation

基金项目: 国家自然科学基金委重点基金资助项目 (No. 50639070); 广西壮族自治区水利厅“十一五”重点资助项目

收稿日期: 2008-04-24; **修订日期:** 2008-05-10

作者简介: 叶飞 (1985 ~), 男, 南京人, 硕士生, 主要从事生态水力学模型研究. E-mail: yefei1891@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qchen@cees.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50639070); and Water Conservancy Department of Guangxi Zhuang Autonomous Region

Received date: 2008-04-24; **Accepted date:** 2008-05-10

Biography: YE Fei, Master candidate, mainly engaged in ecohydraulics modelling. E-mail: yefei1891@163.com

scheme were predicted. In particular, the potentials of integrating global formulation and cellular automata were well studied.

Key Words: riparian vegetation; flow regulation; cellular automata; model integration

岸边带位于水生和陆生环境的交界处,由多样化的河床及其承载的生物群落共同组成^[1]。在岸边带的垂向水分梯度上,不同的植物种类依照生理特性的差异占据不同的生态位,并沿河流走向形成带状的分布。尽管岸边带的植被分布具有一定的规律,但受到河流水位季节性波动的显著影响。此外,河流开发治理如水库运行、堤坝建设以及导流工程等对岸边带生态系统产生剧烈作用,造成长期的累积性影响,而且这些影响通常是负面的,其强度也往往大于自然作用^[2]。因此,研究河流开发导致的水文情势的改变对岸边带植被的影响具有重要意义。

传统的生态位模型通常假设河流地形不受水流条件和植被演变的影响,采样时植被的分布处于近似稳定状态,植物的生境适应性可以用一个或一组环境变量表示且植被分布与环境变量之间的对应关系稳定不变;模型中的环境变量主要围绕岸边带的水分梯度,包括岸边高程^[3]、年淹没或者干旱时间比例^[4]、洪水历时和间隔等^[5]。此类模型比较容易实现,但缺点在于它的静态特性。在动态变化强烈的岸边带系统中,理想的近似稳定状态很难达到。此外,模型的预测结果锁定于重新达到稳态的时间点上,而岸边带生态系统受到根本性影响后重新达到稳态的过程有时需要几十年甚至更长的时间,期间需要相关信息来掌握系统的动态变化过程。

基于过程的方法从更为连续的角度研究岸边带生态系统的演变,此类方法通过对历史数据的分析,综合考虑了植物的演替规律及其与河流地形过程的相互作用^[6]。在此基础上建立的模型^[7~9]能够较为合理地预测河貌及生物的变化过程。但是,此类模型大多属于经验性或概念性的。

更为重要的是上述两类模型都没有妥善处理环境要素空间异质性和生物间局部相互作用的影响,因此本研究采用元胞自动机(cellular automata)开发了空间显式植物模型,通过与水动力模块的耦合,分析在水环境变化影响下岸边带植被的生长与演替过程^[10]。以往研究^[2~9]表明淹水深度和淹水历时是影响岸边带植物生长演替的关键因素,因此本模型重点考虑水位、流速和植物的生理特性 3 个要素。通过模拟漓江中游一段复式河道的 3 种岸边带植物(刺果酸模、水蓼和益母草)在上游多个水库联合运行作用下的演变,分析了水流调节对岸边带植被的影响。从应用实例的模拟结果和实测数据的对比可以看出,耦合全局影响和局部过程的空间显式模型为河流生态水力学研究提供了新的方法。

1 研究方法

岸边带生态系统的关键要素包括水流、地形和植被,这些环境因子和生物因子紧密联系且相互作用。为了模拟各个过程及其相互关系,开发的耦合模型结构如图 1 所示,其中“全局影响”是指由自然或人为因素带来的外部作用力,如气候变化、水流调节等。

耦合模型中,水流条件采用二维水动力模型进行模拟(公式 1~4):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\omega}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - f v = -\frac{1}{\rho_0} P_x + F_x + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\omega}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + f u = -\frac{1}{\rho_0} P_y + F_y + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_y \quad (2)$$

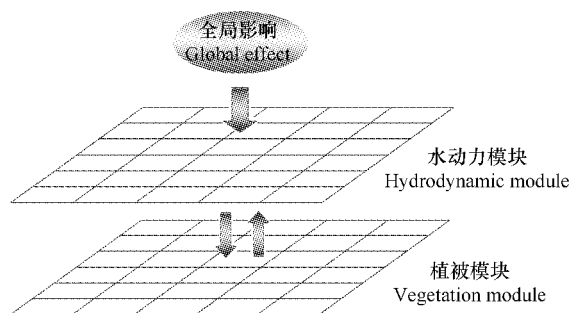


图 1 水动力-植被耦合模型结构

Fig. 1 The framework of the integrated hydrodynamics-vegetation model

$$\frac{\partial p}{\partial \sigma} = -\rho g H \quad (3)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial (Hu)}{\partial x} + \frac{\partial (Hv)}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = Q \quad (4)$$

式中, ω 为垂向流速 (ms^{-1}); f 为科里奥利参数 ($1/\text{s}$); ν_v 为垂向涡粘度 ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$); P_x, P_y 为静水压力梯度 ($\text{kg/m}^2 \text{s}^2$); F_x, F_y 为 x 和 y 方向上的湍流动量通量 (ms^{-2}); M_x, M_y 为 x 和 y 方向上动量的源和漏 (ms^{-2}); Q 为单位面积上的总体进水或取水量 (ms^{-1})。上述方程采用交替方向迭代法 (ADI) 进行数值求解。

植被生长演替采用二维元胞自动机方法进行模拟。元胞自动机是一个离散的数学系统,它根据研究对象的特征空间尺度将研究区域划分成大小完全一致的单元 (图 2), 每个单元有其特征和取值 $a_{i,j}^t$, 单元的取值每过一个特征时间步长就进行更新, 新的取值取决于该单元的环境条件、该单元和其周围邻居当前的取值情况以及它们之间的相互作用规律 (式 5~6), 这种动态过程不断演进^[11]:

$$a_i^{t+1} = \phi(a_{i-1}^t, a_i^t, a_{i+1}^t) \quad (5)$$

$$a_{i,j}^{t+1} = \phi(a_{i-1,j-1}^t, a_{i-1,j}^t, a_{i-1,j+1}^t, a_{i,j-1}^t, a_{i,j}^t, a_{i,j+1}^t, a_{i+1,j-1}^t, a_{i+1,j}^t, a_{i+1,j+1}^t) \quad (6)$$

元胞自动机模式类似于流体力学中的欧拉方法, 作为一种空间显式模型, 元胞自动机已经被广泛应用于生态模拟, 包括森林动态模拟^[12]、水生植物竞争性生长模拟^[13]和湿地植物模拟^[14]等。

在本研究中, 用一定大小和形状的网络覆盖岸边带区域, 并给网络中的每个单元赋予相应的物理和生物属性, 包括岸边带地形以及与植物生理有关的参数。植物的“生长”对应于每个时间步上单元属性的更新。更新规则考虑了植物生长周期中的一些重要过程, 如图 3 所示。植物受到的外力 (水位和流速) 影响通过水环境模块引入。

2 研究实例

2.1 研究地区背景

作为著名的风景旅游胜地, 漓江目前存在的问题之一是河流流量的季节性波动太大, 雨季时的流量峰值可达 $12000 \text{ m}^3/\text{s}$, 而枯水期流量仅为 $12 \text{ m}^3/\text{s}$ 。为满足旅游航运的需要, 漓江上游已修建和正在修建一序列水库 (图 4a)。当所有水库投入运行后, 枯水期流量可达 $60 \text{ m}^3/\text{s}$ 。水库运行改变了河流的水文情势和水生态系统, 随着更多水库投入使用, 这种变化将更为明显。因此, 有必要定量分析和预测水库联合运行后下游水生态系统受到的累积性影响。本研究选择了漓江下游靠近阳朔水文站的局部河段作为研究区域 (图 4b), 收集了建库前和建库后的水文资料, 并针对该区域的地形和生物

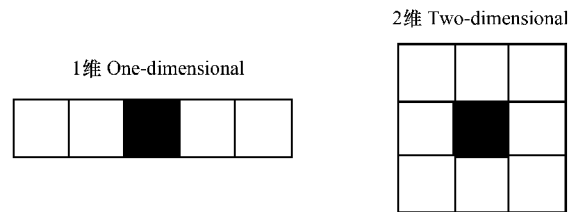


图 2 元胞自动机

Fig. 2 Cellular automata

左: 1 维 one-dimensional, 右: 2 维 two-dimensional

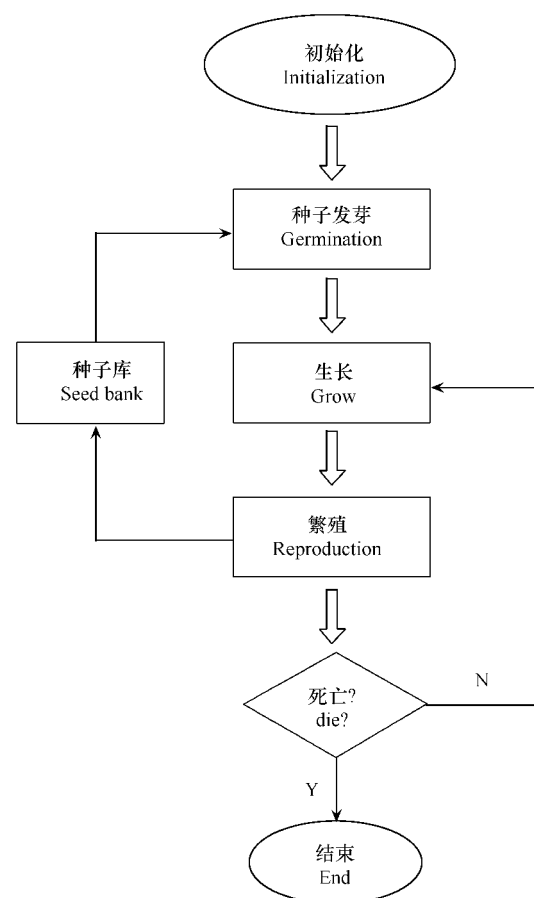


图 3 植被模块中所模拟的植物生长周期

Fig. 3 Plant life cycle simulated by vegetation module

特征进行了详细的野外调查。

2.2 水动力模拟

研究河段的水下地形采用声学多普勒水流剖面集成系统 RiverCat (SonTek/YSI 公司生产) 进行量测, 如图 4 所示。对水流进行数值计算时采用交替方向迭代法 (ADI), 为了保障计算稳定, 对网格大小进行了优化, 使 Crant 数接近于 8。水流模拟的边界条件采用阳朔水文站的历史测量数据, 其中上游边界采用日均流量数据, 下游边界采用日均水位数据。模型的初始条件通过冷启动 (即 $u = v = 0$) 给出, 在运行了一段时间之后, 模型初始条件的影响逐步消失, 此时的计算结果作为正式模拟时的热启动条件。模拟的时间步长为 12 s, 输出数据采用日均值以便与植被模块的时间步长一致。水动力模块针对不同的典型水文年进行了模拟, 包括建库前与建库后的丰、平、枯水文年。

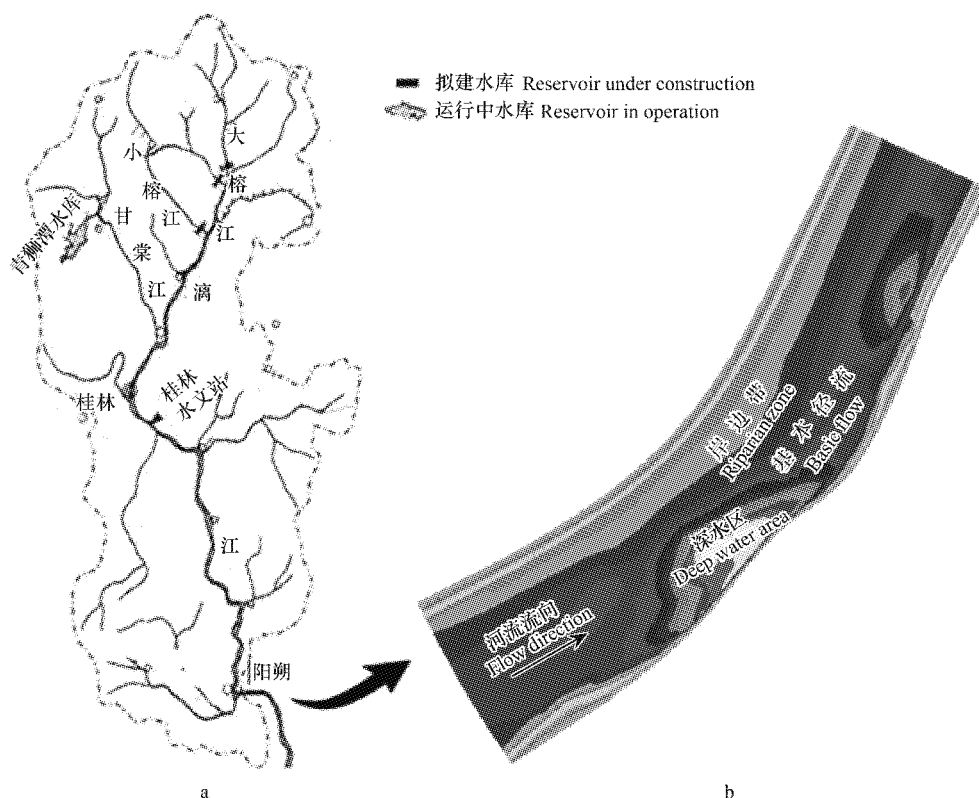


图 4 研究区域的位置和局部河段的地形

Fig. 4 Study site and the channel bathymetry

2.3 植被模拟

植被模型选择了研究区域较为典型的 3 种 1 年生草本植物, 分别是刺果酸模 (*Rumex maritimus*)、水蓼 (*Polygonum hydropiper*) 和益母草 (*Leonurus heterophyllus*), 这 3 种草本植物的生长周期较短, 并且受外界不利条件影响较为明显。植被的历史分布状况通过资料调查获得, 目前的分布情况以及植物的生理特性由野外观测、室内实验和相关文献资料获取。表 1 列举了模型中使用的主要参数及其取值, 图 5 给出了两种植物对水淹的典型响应。

植被模拟基于元胞自动机方法, 模拟的重点在于外界不利条件对生长期植物产生的胁迫作用。为了简化问题, 模型中做了一些假设, 主要包括:

(1) 元胞单元格的大小为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ (实地观察发现, 一株生长旺盛的益母草可以在 1 m^2 范围内排斥其它植物物种的生长);

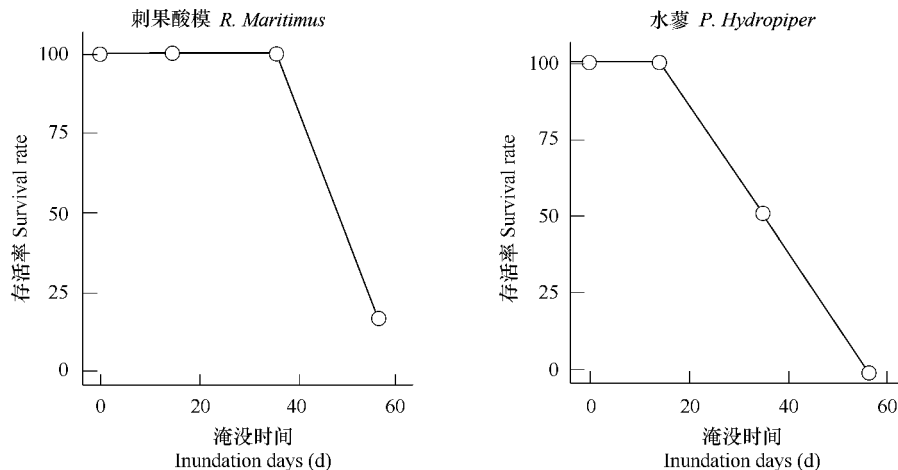


图5 刺果酸模和水蓼的淹没胁迫实验

Fig. 5 Inundation stress experiments of *R. Maritimus* and *P. Hydropiper*

- (2) 模型中用生物量表示植物,生物量以“去灰分干重(AFDW)”计算;
- (3) 近似认为3种1年生植物的生命周期相同;
- (4) 模型没有考虑高能量洪水水流对植物的冲刷及由此造成的生物量损失。

植被模型的主要部分即元胞自动机的演变规则如下:

(1) 种子发芽 在河流岸边带,种子的发芽常常伴随在春天第1次洪水消退以后。草本植物的种子产量丰富,传播能力强,且休眠期较长,可以在土壤中储存数年直到外界条件适宜,所以草本植物的种子库在岸边带上分布较均匀,且种子的数量、种类丰富,与现有的地表植被关系较小^[15]。因此,对于模型研究的小范围岸边带,认为种子不是植被分布的限制性因素。在模型初始化时,假设3种植物的种子分布均匀,数量充足。

表1 植被模型参数

Table 1 Empirical values for the parameters of the vegetation module

项目 Items	刺果酸模 <i>R. maritimus</i>	水蓼 <i>P. hydropiper</i>	益母草 <i>L. heterophyllus</i>
种子重量 Seed weight(g)	0.0002	0.0002	0.0002
最大生长率 Max growth rate	0.13	0.12	0.13
单株最大生物量(g) Max biomass per plant	2.70	1.65	3.00
淹没导致的生物量损失 Biomass loss rate during inundation	0*	0.02/d	/**
淹没导致的死亡率 Mortality rate during inundation	0.05/d (i. d. >40 d)***	0.025/d (i. d. >10 d)	0.8/d (i. d. >5 d)
干旱对生长速率的阻碍 Growth rate decrease during drought	63% (d. d. >5 d)****	27% (d. d. >15 d)	0
干旱导致的死亡率 Mortality rate during drought	0.05/d (d. d. >10 d)	0.05/d (d. d. >20 d)	0

* 0表示淹没条件下植物非正常生长,但没有生物量累积; ** 益母草在淹没时生物量大量损失,此处以死亡率表示,约为0.1~0.2/d; *** i. d.: 淹没时间; **** d. d.: 干旱时间

* “0” indicates no biomass loss but not normal growth; ** *L. Heterophyllus* suffers great biomass loss during inundation, with an assumed mortality rate of 0.1~0.2/d during short period of inundation; *** i. d.: inundation duration; **** d. d.: drought duration

(2) 快速生长期:幼苗和青年期植株最容易受到外界不利条件影响,且不同物种的耐受能力不同,这在很大程度上制约着植物在岸边带水位梯度上的分布。刺果酸模和水蓼是较为典型的岸边带植物,而益母草对淹没的耐受能力较差,通常出现在洪水难以到达的高地上。刺果酸模在淹没时表现出自身优化的策略,例如伸长枝芽恢复叶气接触,可以有效的减少生物量消耗。处于青年期的刺果酸模可以耐受40d的淹没,但淹没时

间继续延长将导致其死亡,淹没超过 60d 后,只有约 25% 的青年期刺果酸模存活。与刺果酸模相比,水蓼不具有显著的自身优化能力,而是依靠水下无氧呼吸耐受淹没,这种方式将消耗更多的碳水化合物,而且淹没导致的死亡率高于刺果酸模。刺果酸模和水蓼对于干旱没有耐受能力,在特别干燥的环境下会很快死亡;相反,益母草适宜在相对干燥的环境中生长,但对洪水淹没的耐受力很低。

(3) 成熟期:处于成熟期的 3 种植物都对外界不利条件表现出很强的耐受力,它们能够忍受更长时间的淹没或干旱,且存活率差别不大。这一时期也是植物繁殖期。

(4) 冬季损失:所有 1 年生草本植物在冬季第 1 次霜冻后死亡,其种子在泥土中进入休眠期,其间伴随着一定数量的种子损失。

(5) 模型中的竞争与扩张关系设计如下:由于各种植物对资源利用情况的差异,用绝对的生物量数值表示单位面积饱和和生物量不够合理,考虑将不同物种用统一的参数表示。令单位面积的资源 $R = 1$,那么物种 i 对资源的利用 $c_i = S/(n_i \times M_{\max}^i)$,其中 S 是样方面积, n 和 $M_{\max}$ 是适宜条件下物种 i 可生长的个数和单株最大生物量。 $M_{\max}$ 的值可能不准确,但经过前期研究发现它对结果的影响不大。因此元胞 k 可利用资源可以表示为:

$$R_k = 1 - c_i \times B_i^k - c_i \times B_i^n \quad (7)$$

其中, R_k 为元胞 k 可利用资源, B_i^k 为元胞 k 中物种 i 的生物量, B_i^n 为从周围扩张到元胞 k 中的物种 i 的生物量。若 $R_k > 0$,各种植物正常生长。若 $R_k \leq 0$,则分两种情况:如果益母草未饱和,那么由于益母草最强的竞争力将保持生长,而刺果酸模和水蓼将受到挤压。如果益母草达到饱和,那么它将根据四周邻居元胞的环境条件进行扩张;如果周围不能扩张,则保持饱和状态下的生长平衡。对于刺果酸模和水蓼,采用类似规则,但考虑到它们竞争力较低,只能占用空余资源。实际调查发现,由于生境状况影响,刺果酸模和水蓼特别是刺果酸模很难达到饱和。

植物模拟的时间步长为 1d。在每个时间步长,植物模块从水动力模块读取水位和流速数据并计算其对植物生长的影响。目前的植被模块只读取水位和流速数据,其它参数例如水温、浊度等也可以通过相同的方法读取。

2.4 模拟结果

水动力条件 水动力模块对 6 个典型水文年的河流流场及洪水过程进行了模拟。图 6 给出了建库前后两个典型平水年(1976 年、1999 年)的水位过程。在建库前的年份,洪水频率高,洪峰流量大、水位高,但每次洪水的历时较短;建库后,洪水的频率和强度有所降低而洪水历时延长。

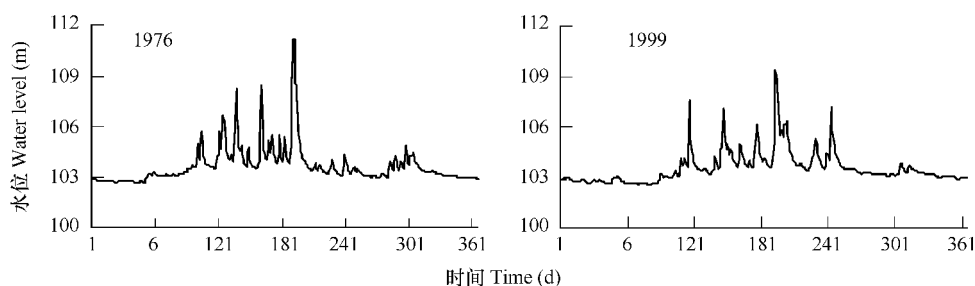


图 6 建库前后平水年的水位过程

Fig. 6 Water levels in typical even-flow years

洪水过程是影响岸边带植被生长分布的重要因素。河流处于基流时,未被淹没的河架部分为 1 年生草本植物提供了栖息地(图 7a);在丰水期,河架通常被部分或完全淹没,从而对生长的植物产生水分胁迫。

植被演替 植被生长和演替过程的模拟结果通过两种方式进行表述,包括植被空间格局和垂向分布。图 8 和图 9 显示的是建库前后平水年(1976 年/1999 年)和枯水年(1979 年/2004 年)的植被分布对比。在每个窗

口中,植物生物量的多少以不同颜色表示。通过对比建库前后的植被分布情况,可以看出以下变化趋势:在建库前的年份中,两种半水栖植物刺果酸模和水蓼的栖息地范围明显大于建库后的年份,水库运行导致半水栖植物的栖息地大幅缩减。同时,耐旱能力较强的益母草开始向水边扩张。这种趋势与传统的岸边带生境模型结论一致。

图 10 显示的是模拟的各年份中,3 种植物的生物量在岸边垂向上的分布情况。由于不同植物物种的绝对生物量存在较大差别,为了便于比较,输出时采用了相对生物量,即每个植株的实际生物量与适宜条件下单株最大生物量的比值。此外,为了反映生物量在整个区

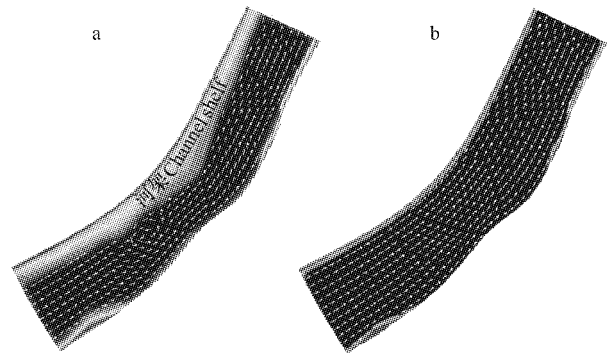


图 7 研究河段典型枯水季(a)和丰水季(b)时的流场
Fig. 7 Flow patterns during base flow (a) and high flow (b) periods

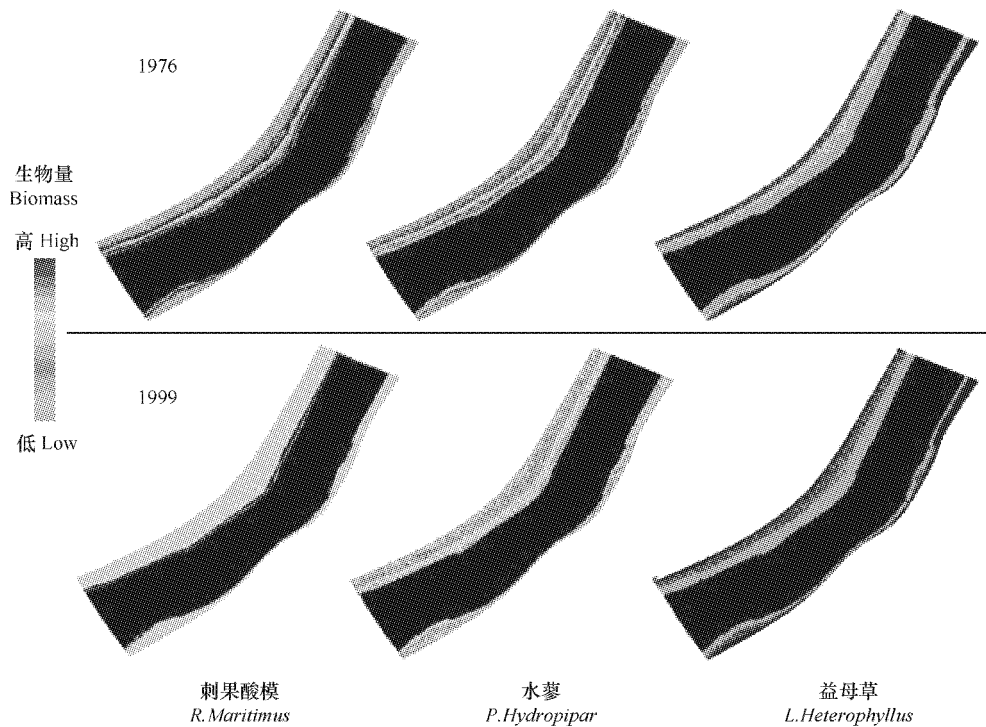


图 8 建库前后平水年(1976 年/1999 年)的植被格局

Fig. 8 Species distribution patterns in pre- and post-dam in dry years

域上的分布,每个物种的相对生物量取同一高程上所有植株的平均值。

通过模拟可以看出 3 种植物在建库前后的生物量分布存在以下趋势:半水栖植物刺果酸模紧靠水边生长,其生物量峰值出现的高程稍高于基流水平面,随着高程增加,该物种由于受到干旱胁迫以及其它旱地物种的竞争而逐渐消失,水蓼与刺果酸模的生物量分布相似,但由于对水淹耐受能力的差别,其生物量达到峰值的高程稍高于刺果酸模;另一方面,在水蓼生物量达到峰值的高程上,益母草开始出现,并随着高程增加逐渐占据主导地位。

水库运行后,刺果酸模的分布范围受到压缩,但生物量峰值并没有显著变化;而水蓼除栖息地范围缩减外,生物量峰值也有所下降。这种现象可以归结为以下原因:水蓼的耐淹能力与刺果酸模相比有一定差距,在被水淹没时,水蓼会消耗更多储存的碳水化合物;但另一方面,水蓼需要一定的洪水频率以缓解来自其它旱地植物的竞争压力。因此,建库后洪水频率的降低以及洪水历时的延长使水蓼栖息地质量下降,而水文情势的

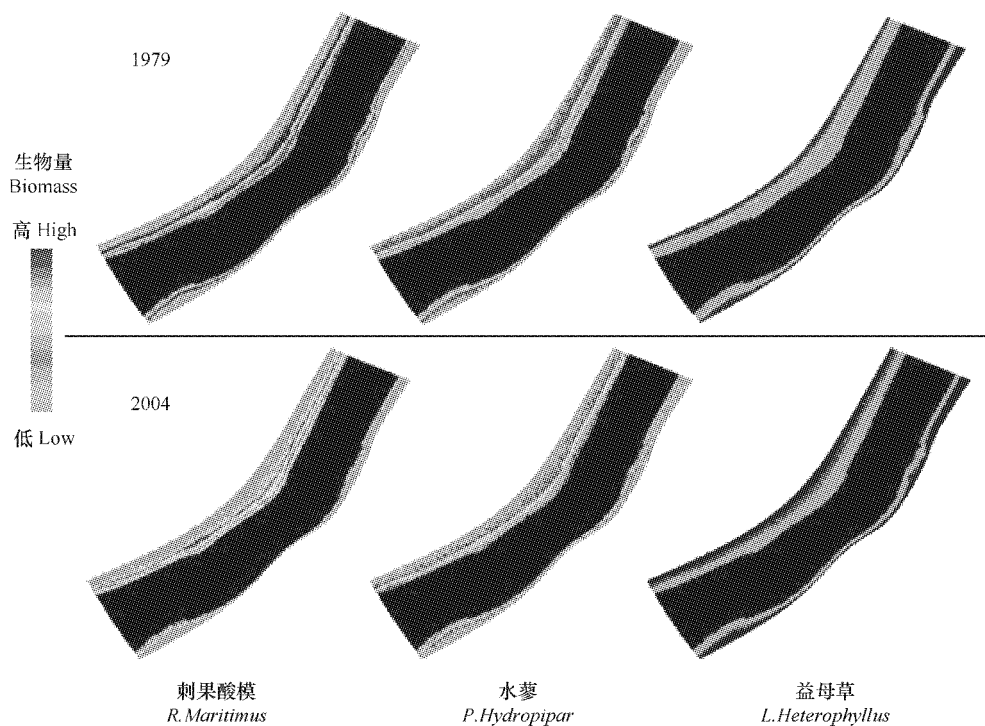


图9 建库前后枯水年(1979年/2004年)的植被格局

Fig. 9 Species distribution patterns in pre- and post-dam in even-flow years

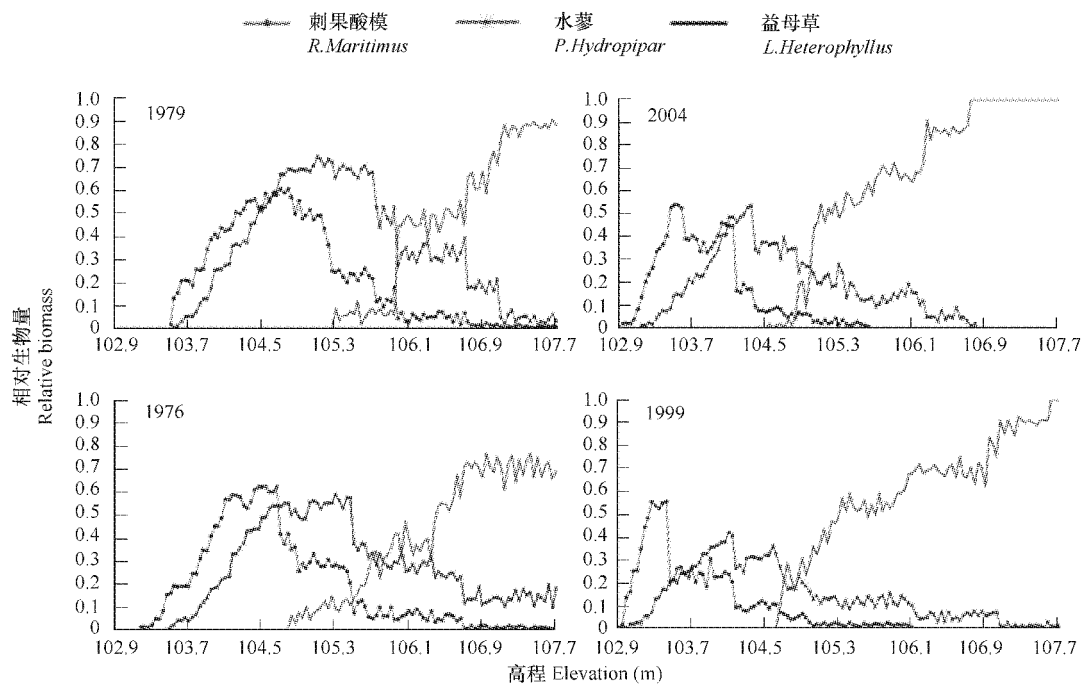


图10 建库前后3种植物生物量的垂向分布

Fig. 10 Biomass distribution of each species in pre- and post-dam years

这种变化适合于益母草的生长,其分布范围和峰值生物量都有所增加。

3 讨论

尽管影响岸边带植物生长和分布的因素很多,但通常仅有少数的几种因子是主导因素。在本研究的模型

中,选用水文情势和植物的生理特性作为影响岸边带植物分布的关键因素,它们决定了植物在特定区域的存在性以及未成熟植株的存活率。

元胞自动机方法可以有效解决岸边带植被生态系统研究中空间异质性和局部相互作用问题。在当前的模型中,空间异质性通过元胞的不同属性值得到体现,包括河流地形、水位波动等物理属性以及植物生物量、植物生理特征等生态属性;而局部相互作用在多个层面上得到实现,包括元胞内部不同物种的竞争、元胞之间的相互作用以及局部环境因子对植物生长的影响。

在分析物种之间的竞争时,直接建立两个植株间的竞争关系比较困难,实际的实验方法是在一定面积上培养一定数量的不同物种,并观察它们在竞争性生长中受抑制的程度^[16]。模型中将单元格大小定为 $1 \times 1 \text{ m}^2$,在此面积内,一棵生长旺盛的益母草植株可以排斥其它物种生长。这样的设置使竞争尽量发生在单元格内,削弱了单元格之间的相互关系。但单元格之间的相互作用在处理种子传播时仍然非常重要。

当前的模型近似认为,在所研究的岸边带区域,3种植物的种子库储量丰富。对于在小范围内生长的一年生草本植物来说,这一假设是可以接受的;但当考虑更大范围和更多物种时,这一假设存在明显的欠缺,因为种子的传播是影响植物分布的重要因素^[2~6]。目前的模型只考虑了水位波动和流速因素,但是模型可以考虑影响植物生长的其它环境条件,包括水温和浊度等。关键因素的选择取决于模拟的对象和当地具体情况。水文情势的剧烈变化往往会影响到泥沙的冲淤平衡,从而导致河貌的演变,尤其是对于冲积型河床,而河床地形决定了岸边带植物的栖息地^[17]。同时岸边带植被对河流地形的演变会产生反作用^[17],目前有很多研究^[18~20]通过引入植物造成的水力糙率处理有植被河床的水流和地形演变问题。在今后的研究中,通过这些物理过程和前期成果,使模型更真实地反映岸边带植被与河流水环境之间的相互作用。

References:

- [1] Malanson G P. Riparian Landscapes. Cambridge University Press, New York, 1993.
- [2] Naiman R J, Décamps H, McClain M E, Likens G E. Riparia: Ecology, Conservation and Management of Streamside Communities. Elsevier/Academic Press, San Diego, 2005.
- [3] Franz E H, Bazzaz E A. Simulation of vegetation response to modified hydrologic regimes: A probabilistic model based on niche differentiation in a floodplain forest. Ecology, 1977, 58: 176—183.
- [4] Auble G T, Friedman J M, Scott M L. Relating riparian vegetation to present and future stream flows. Ecological Applications, 1994, 4: 544—554.
- [5] Toner M, Keddy P. River hydrology and riparian wetlands: A predictive model for ecological assembly. Ecological Applications, 1997, 7: 236—246.
- [6] Merritt D M, Cooper D J. Riparian vegetation and channel change in response to river regulation: A comparative study of regulated and unregulated streams in the Green river basin, USA. Regulated Rivers, 2000, 16: 543—564.
- [7] Johnson W C. Woodland expansions in the Platte River, Nebraska: patterns and causes. Ecological Monographs, 1994, 64: 45—84.
- [8] Stevens L E, Schmidt J C, Ayers T J, Brown B T. Flow regulation, geomorphology, and Colorado River marsh development in the Grand Canyon, Arizona. Ecological Applications, 1995, 5: 1025—1039.
- [9] Shafroth P B, Stromberg J C, Patten D T. Riparian vegetation response to altered disturbance and stress regimes. Ecological Applications, 2002, 12: 107—123.
- [10] Chen Q, Ouyang Z Y. Integrated ecohydraulics model and the application. Journal of Hydraulics Engineering, 2005, 36(11): 1273—1279.
- [11] Chen Q, Mynett A E, Wang F. Application of soft computation to ecological models. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(8): 2594—2601.
- [12] David A, Ricard V S. The DivGame simulator: a stochastic cellular automata model of rainforest dynamics. Ecological Modelling, 2000, 133: 131—141.
- [13] Chen Q, Mynett A E, Minns A W. Application of cellular automata to modelling competitive growths of two underwater species *Chara aspera* and *Potamogeton pectinatus* in Lake Veluwe. Ecological Modelling, 2002, 147: 253—265.

- [14] Ellison A M, Bedford B L. Response of a wetland vascular plant community to disturbance: a simulation study. *Ecological Applications*, 1995, 5: 109 — 123.
- [15] Schneider R L, Sharitz R R. Seed bank dynamics in a South-eastern riverine swamp. *American Journal of Botany*, 1986, 73: 1022 — 1030.
- [16] Carter M F, Grace J B. Relationships between flooding tolerance, life history, and short-term competitive performance in three species of *Polygonum*. *American Journal of Botany*, 1990, 77: 381 — 387.
- [17] Chen Q, Ouyang Z Y. Watershed ecology and modelling system. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1153 — 1161.
- [18] Tsujimoto, T. Fluvial processes in streams with vegetation. *Journal of Hydraulic Research*, 1999, 37: 789 — 800.
- [19] Erduran K S, Kutija V. Quasi-three-dimensional numerical model for flow through flexible, rigid, submerged and non-submerged vegetation. *Journal of Hydroinformatics*, 2003, 189 — 202.
- [20] Baptist M. Modelling floodplain biogeomorphology [M]. PhD thesis, Delft University Press, ISBN: 90-407-2582-9, 2005.

参考文献:

- [10] 陈求稳, 欧阳志云. 生态水力学耦合模型. *水利学报*, 2005, 36(11): 1273 ~ 1279.
- [11] 陈求稳, Mynett A E, 王菲. 软计算在生态模型中的应用. *生态学报*, 2006, 26(8): 2594 ~ 2601.
- [17] 陈求稳, 欧阳志云. 流域生态学及模型系统. *生态学报*, 2005, 25(5): 1153 ~ 1161.

特征进行了详细的野外调查。

2.2 水动力模拟

研究河段的水下地形采用声学多普勒水流剖面集成系统 RiverCat (SonTek/YSI 公司生产) 进行量测, 如图 4 所示。对水流进行数值计算时采用交替方向迭代法 (ADI), 为了保障计算稳定, 对网格大小进行了优化, 使 Crant 数接近于 8。水流模拟的边界条件采用阳朔水文站的历史测量数据, 其中上游边界采用日均流量数据, 下游边界采用日均水位数据。模型的初始条件通过冷启动 (即 $u = v = 0$) 给出, 在运行了一段时间之后, 模型初始条件的影响逐步消失, 此时的计算结果作为正式模拟时的热启动条件。模拟的时间步长为 12 s, 输出数据采用日均值以便与植被模块的时间步长一致。水动力模块针对不同的典型水文年进行了模拟, 包括建库前与建库后的丰、平、枯水文年。

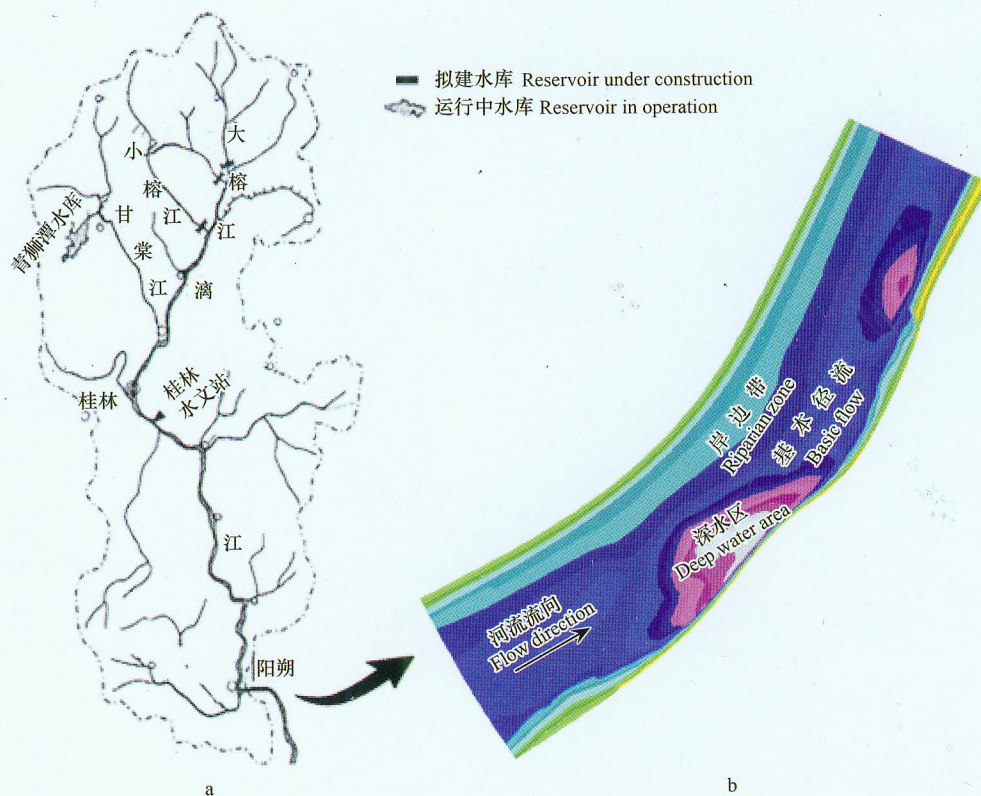


图 4 研究区域的位置和局部河段的地形

Fig. 4 Study site and the channel bathymetry

2.3 植被模拟

植被模型选择了研究区域较为典型的 3 种 1 年生草本植物, 分别是刺果酸模 (*Rumex maritimus*)、水蓼 (*Polygonum hydropiper*) 和益母草 (*Leonurus heterophyllus*), 这 3 种草本植物的生长周期较短, 并且受外界不利条件影响较为明显。植被的历史分布状况通过资料调查获得, 目前的分布情况以及植物的生理特性由野外观测、室内实验和相关文献资料获取。表 1 列举了模型中使用的主要参数及其取值, 图 5 给出了两种植物对水淹的典型响应。

植被模拟基于元胞自动机方法, 模拟的重点在于外界不利条件对生长期植物产生的胁迫作用。为了简化问题, 模型中做了一些假设, 主要包括:

(1) 元胞单元格的大小为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ (实地观察发现, 一株生长旺盛的益母草可以在 1 m^2 范围内排斥其它植物物种的生长);

口中,植物生物量的多少以不同颜色表示。通过对比建库前后的植被分布情况,可以看出以下变化趋势:在建库前的年份中,两种半水栖植物刺果酸模和水蓼的栖息地范围明显大于建库后的年份,水库运行导致半水栖植物的栖息地大幅缩减。同时,耐旱能力较强的益母草开始向水边扩张。这种趋势与传统的岸边带生境模型结论一致。

图 10 显示的是模拟的各年份中,3 种植物的生物量在岸边垂向上的分布情况。由于不同植物物种的绝对生物量存在较大差别,为了便于比较,输出时采用了相对生物量,即每个植株的实际生物量与适宜条件下单株最大生物量的比值。此外,为了反映生物量在整个区

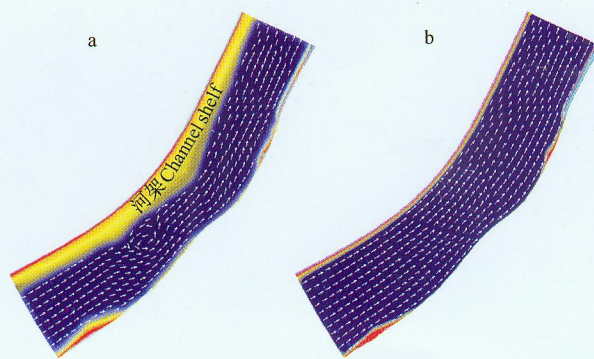


图 7 研究河段典型枯水季(a)和丰水季(b)时的流场

Fig. 7 Flow patterns during base flow (a) and high flow (b) periods

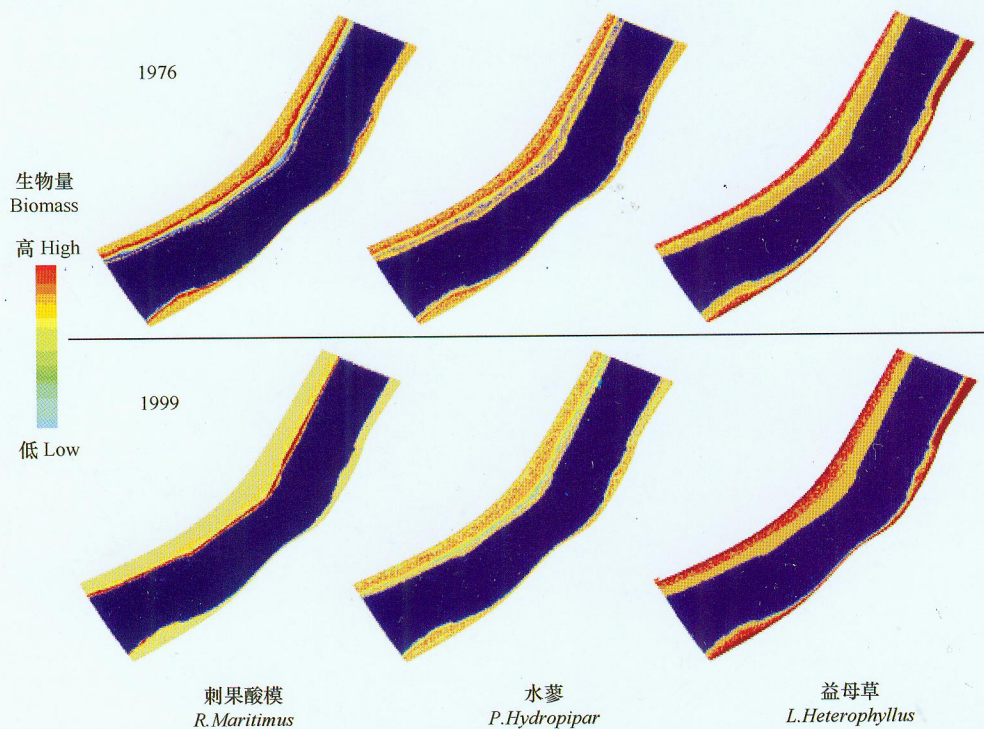


图 8 建库前后平水年(1976 年/1999 年)的植被格局

Fig. 8 Species distribution patterns in pre- and post-dam in dry years

域上的分布,每个物种的相对生物量取同一高程上所有植株的平均值。

通过模拟可以看出 3 种植物在建库前后的生物量分布存在以下趋势:半水栖植物刺果酸模紧靠水边生长,其生物量峰值出现的高程稍高于基流水平面,随着高程增加,该物种由于受到干旱胁迫以及其它旱地物种的竞争而逐渐消失,水蓼与刺果酸模的生物量分布相似,但由于对水淹耐受能力的差别,其生物量达到峰值的高程稍高于刺果酸模;另一方面,在水蓼生物量达到峰值的高程上,益母草开始出现,并随着高程增加逐渐占据主导地位。

水库运行后,刺果酸模的分布范围受到压缩,但生物量峰值并没有显著变化;而水蓼除栖息地范围缩减外,生物量峰值也有所下降。这种现象可以归结为以下原因:水蓼的耐淹能力与刺果酸模相比有一定差距,在被水淹没时,水蓼会消耗更多储存的碳水化合物;但另一方面,水蓼需要一定的洪水频率以缓解来自其它旱地植物的竞争压力。因此,建库后洪水频率的降低以及洪水历时的延长使水蓼栖息地质量下降,而水文情势的

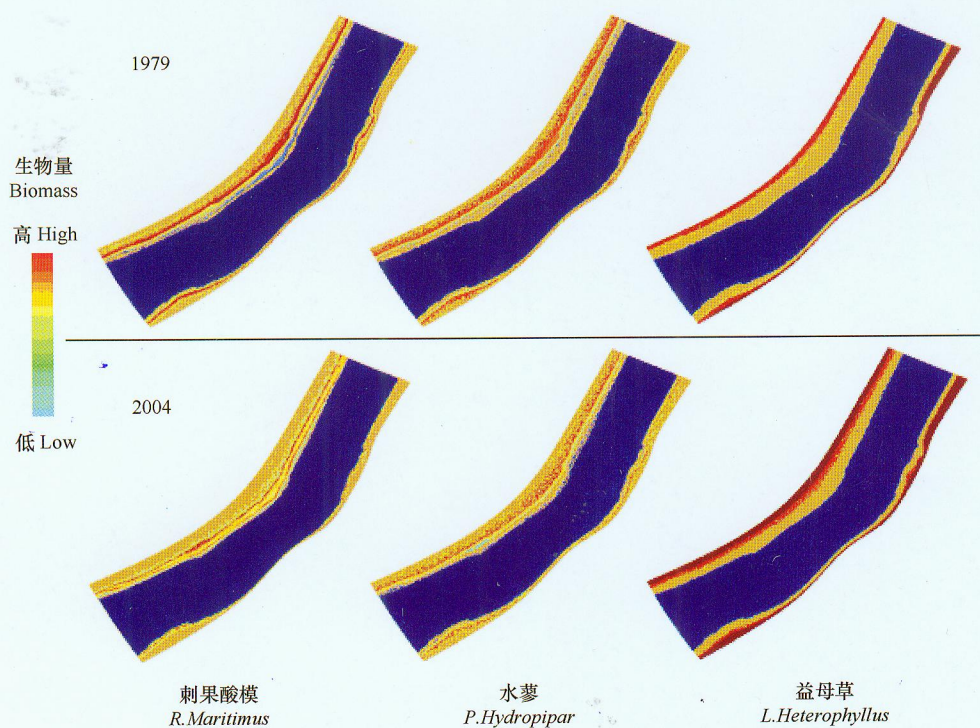


图9 建库前后枯水年(1979年/2004年)的植被格局

Fig. 9 Species distribution patterns in pre- and post-dam in even-flow years

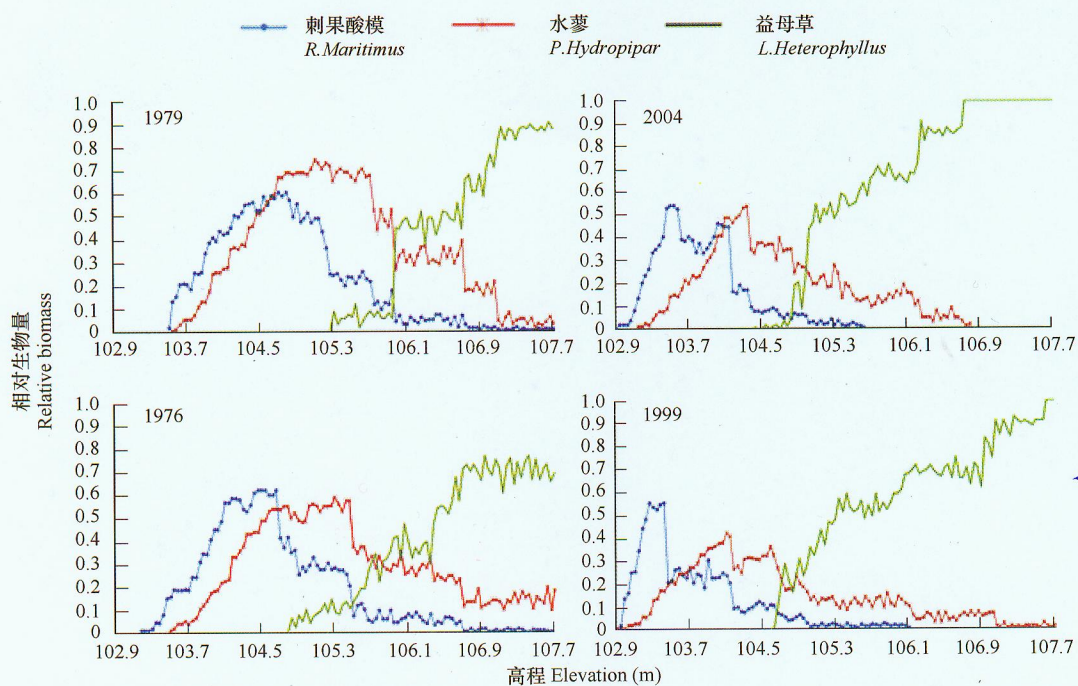


图10 建库前后3种植物生物量的垂向分布

Fig. 10 Biomass distribution of each species in pre- and post-dam years

这种变化适合于益母草的生长,其分布范围和峰值生物量都有所增加。

3 讨论

尽管影响岸边带植物生长和分布的因素很多,但通常仅有少数的几种因子是主导因素。在本研究的模型