

文章编号: 2097-096X(2024)-06-0539-19

湿地植物生态数值模拟进展及鄱阳湖湿地研究示例

韩 祯^{1,2,3}, 孙 龙^{1,2,3}, 王世岩^{1,2,3}, 汪 洁^{1,2,3}, 刘晓波^{1,2,3}, 彭文启^{1,2,3}

(1. 中国水利水电科学研究院 水生态环境研究所, 北京 100038; 2. 水利部京津冀水安全保障重点实验室 北京 100038;
3. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 湿地植物群落结构和空间分布格局对湿地生态系统结构和功能起着决定性作用。传统的野外监测和受控实验在研究大尺度湿地植物群落结构和空间分布方面存在局限, 在建立“生态过程-空间格局”有机联系并预测动态变化方面存在不足。因此, 数学模型成为研究湿地植物种群扩张、空间分布及相互关系的重要工具。通过综述国内外相关研究文献, 按照模型对生态机理及空间格局刻画的程度, 湿地植物生态模拟的数学模型可分为统计模型、物种分布模型和种群动力学模型三种类型。尽管当前湿地植物模型在理论方法层面取得一定进展, 但环境条件模块与植物模块的时空匹配问题, 以及湿地植物生活史过程的机理融合问题显著制约了模型的合理性和准确性。最后, 以大型通江湖泊湿地-鄱阳湖为例, 构建了水动力驱动下的湿地植物生态数值模拟框架, 从机理和应用两个层面提出了湿地植物生态数值模拟的发展方向。在机理层面, 应基于通江湖泊独特的水文过程, 强化生态学机理支撑; 在应用层面, 应聚焦江湖关系变化下的水文情势, 在水动力模型基础上耦合种群动力学方法, 刻画植被演替动态及空间格局, 并通过野外调查和遥感影响比对验证, 以提高模型精度。

关键词: 湿地; 植物生态数值模拟; 空间分布; 种群动力学; 进展

中图分类号: Q948

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20240028

1 研究背景

湿地是位于陆地生态系统与水生生态系统之间的过渡性地带, 具有水陆交错、干湿交替的水文特征。湿地植物指生长在湿地环境中的植物, 是覆盖湿地的植物群落的总称, 具有适应水陆交错、干湿交替环境的生理生态学特征, 能够耐受周期性干旱和长期淹水, 是湿地生态系统物质循环和能量流动的基础。湿地植被的群落结构及空间分布格局, 决定了湿地生态系统的组成、结构与功能^[1-2]。

野外监测、受控实验和数学模型是研究湿地植被群落结构及空间分布的经典手段。但前两种研究手段在群落结构演替、进化动态和生态系统长期变化等方面存在局限^[3-6], 首先, 通过常用的监测和实验难以表现植被群落结构演替和进化在较大时空尺度的特征^[7-8]; 其次, 由于“竞争-促进”等种间相互作用同时存在于自然生态系统, 现有实验条件和技术手段难以区分二者影响; 第三, 许多不同生态过程能够产生相似的群落分布格局, 而同一过程在不同条件下又能产生不同格局^[9], 仅通过野外定位观测和受控试验, 难以准确建立“过程-格局”的有机联系, 并且预测其动态变化。对于偏远或难以到达的地区, 原位监测及原位试验工作往往还需要大量的人力和时间投入, 且采集的数据局限于局部样地, 无法全面反映整个研究区域的情况。因此, 数学模型被越来越多地引入到湿地植物空间分布、相互关系及其生态效应的研究中^[8,10-12], 帮助科学家和管理者理解特定生态格局的形成机

收稿日期: 2024-02-26; 网络首发时间: 2024-10-30

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/10.1788.TV.20241029.1109.001>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3209001); 中国水科院基本科研业务费项目(WE110145B0012023); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题(SK12022ZD02)

作者简介: 韩祯(1986-), 博士, 正高级工程师, 主要从事湿地保护与恢复、河湖生态流量、水工程生态影响评价等研究。E-mail: zhenhan@iwhr.com

通信作者: 刘晓波(1978-), 博士, 正高级工程师, 主要从事水环境数值模拟、河湖生态流量、湿地保护与修复等研究。E-mail: xbliu@iwhr.com

制^[13-14]，深入探索生态过程与格局的因果关系。

基于 CNKI 期刊库及 Web of Science 核心合集选取中文文献及英文文献样本，中文设置检索条件为“TKA(篇文摘)=‘湿地’AND TKA(篇文摘)=‘植被’+‘植物’AND TKA(篇文摘)=‘模拟’+‘模型’AND TKA(篇文摘)=‘群落’+‘种群’+‘斑块’+‘繁殖’”；英文设置检索条件为“Topic(主题)=‘Wetland plants OR Wetland vegetation’and Title(标题)=‘model OR simulation’ and Topic(主题)=‘Community OR Population OR Reproduction’”。得到有关“湿地植物生态数值模拟”的中文文献 276 篇，英文文献 741 篇。利用 Cite space 软件对文献信息进行可视化分析，量化了相关文献的发文量和研究热点内容。

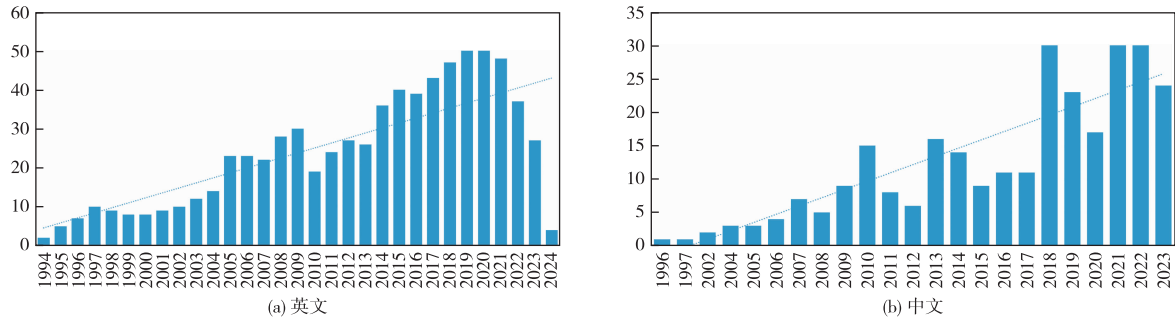


图 1 湿地植物生态数值模拟相关文献发文量变化图

Fig.1 Changes in the number of publications on wetland plant simulation related literature

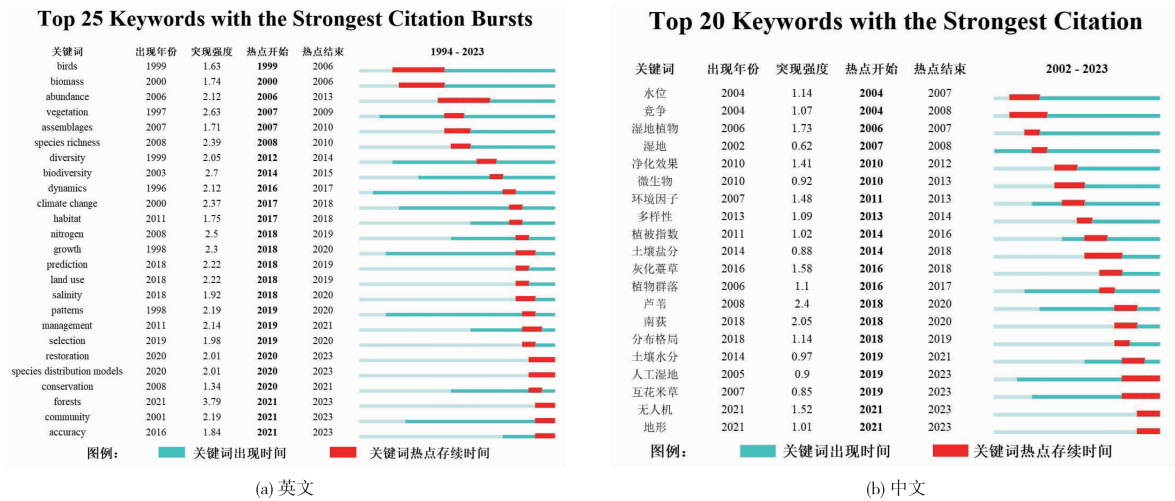


图 2 关键词热点变化图

Fig.2 Changes in keyword hotspots

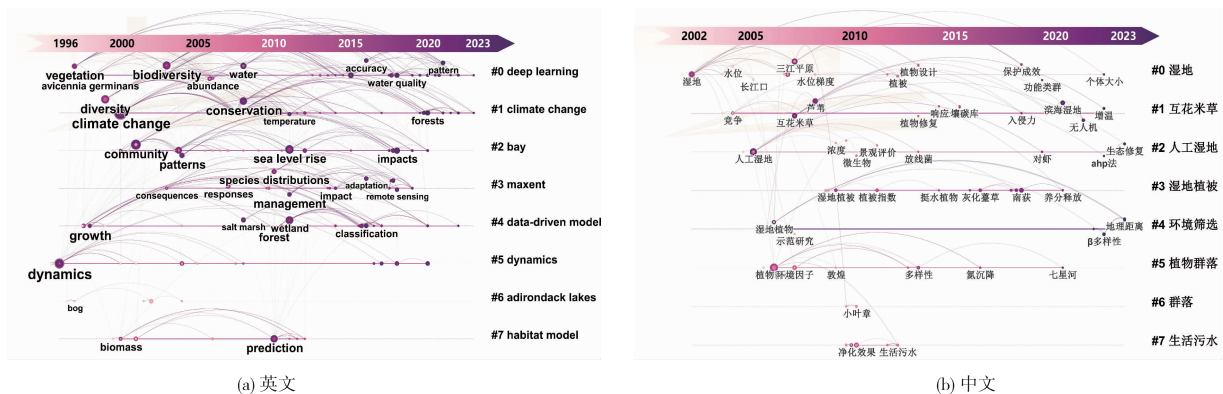


图 3 关键词聚类分析图谱

Fig.3 Keyword clustering analysis graph

根据检索到的相关中英文文献分析发文趋势(图 1)可以发现,有关湿地植物生态数值模拟的文献中,英文文献关于湿地植物生态数值模拟的研究较早,在 2003 年以前发文量年均不足 10 篇,中文文献在 2010 年以前年均不足 10 篇,此后数量快速增加,特别是 2018 年以后中文文献数量明显跃升,年均发文量 26 篇,反映湿地植物生态数值模拟的相关研究愈发得到国内学者的关注。

通过关键词热点变化图(图 2)及关键词聚类分析图谱(图 3)分析研究热点的变化情况:英文文献中,涉及的研究主题主要包括对鸟类种群动态的监测、生物量分布的评估、物种丰富度和多样性的量化,以及生物多样性的保护等。研究的热点是氮、植物生长模式、盐分、栖息地、气候变化等关键指标或影响因素,物种分布模型是研究湿地植物的重要手段。中文文献中环境因子、湿地、植物群落是备受关注的关键词;随着研究方向逐渐细化,关注的重点转向植物多样性、植被指数、空间分布、景观格局等方向;灰化藁草、芦苇、南荻、互花米草是当前该领域的常见目标对象,人工湿地植物的出现频次也在不断增加。关键词热点变化反映出相关领域专家学者对湿地植物群落结构、分布格局及其成因机制的认识不断加深,模拟工作的理论内涵逐渐丰富。

2 湿地植物生态模拟数学模型的研究进展

2.1 统计模型 统计模型主要适用于揭示湿地植物对环境变化的响应关系^[15]。现阶段已经形成线性回归、排序、广义线性模型、高斯模型、广义可加模型等为主要构成的统计模型体系;统计学模型能够解释物种多度、密度、株高和生物量等指标与水深、温度等环境条件的回归关系,但无法反映具体的生态过程和机理。生态位概念和高斯模型,是此类统计模型的理论基础和常用分析手段^[16-17]。贺强,崔保山等^[18]以黄河三角洲滨海盐沼湿地为研究区,在大规模样方调查的基础上,以水深和盐度为自变量,生物量和高度为因变量,利用高斯模型量化了翅碱蓬的适宜分布水深和适宜耐受盐度,继而解释了水盐梯度下,翅碱蓬群落的组成结构变化。与之类似,韩祯等^[19]基于鄱阳湖二维水动力模拟的输出结果,利用高斯模型建立了淹水时长和湿地植被分布面积的统计关系,量化了苔草等 6 种优势湿地植被对淹水时长的最适、适宜生态阈值区间。毋庸置疑,此类模型在量化植被生态需求,建立湿地“生态-水文”响应关系方面具有重要作用,但其在空间表现上类似“零维模型”,即不考虑空间异质性的简化模型,模型假设生态系统中的所有组分都是均匀混合的,因此没有空间结构,无法体现湿地植被分布的空间异质性。

高斯模型通常考虑某一关键环境因子,如水深、盐度、淹水时间等,根据“钟形响应曲线”的特征参数 μ 和 σ ,量化单个种群对某一关键环境因子的生态需求,反映的是“一对一”关系。其它应用较为广泛的广义线性模型(Generalized Linear Model, GLM)、广义可加模型(Generalized Additive Model, GAM),可以反映单个种群与多个环境因子的“一对多”关系,能够用于植被制图。排序(ordination)则侧重于植被对多个环境因子的响应,用于得出研究区域的主要环境梯度,提供了物种聚集和植物群落的概略描述^[20]。通过排序,植物种排列在多维空间中,排序轴(即空间的“维”)能够反映一定的生态梯度,每个植物种则是该空间的一个点,排序图可用于解释植物种空间分布及其与环境梯度的关系。在实际应用中,排序常基于线性和单峰模型两种,根据植被样方调查数据的正态分布情况决定。

2.2 物种分布模型 物种分布模型(SDMs, Species Distribution Models)适用于模拟植被的时空分布格局,尤其适用于景观尺度上了解植被的群落结构和空间分布特征^[21-22]。现阶段物种分布模型已发展形成两大类:一是统计模型与遥感、GIS 等有机结合实现统计模型结果的空间表达;二是以最大熵模型为代表的软件工具,通过输入物种分布的经纬度等空间信息,耦合温度、水深等条件即可预测环境条件改变后的物种潜在时空分布。与统计学模型相比,物种分布模型虽然在时空特征上更加直观,但同样无法反映植被的生活史过程。

物种分布模型可被认为是统计学模型的空间表达,在 20 世纪 80 年代,由于计算机技术和统计科学的发展,使得 SDM 逐渐转向以物种分布预测为研究目标^[23]。20 世纪 90 年代以后,GIS 技术快速

发展, 数字高程、遥感等各类空间数据的获取愈发便捷, 显著增强了 SDMs 的应用能力, 一些经典的物种分布模型, 包括 ENFA(生态位因子模型, Ecological Niche Factor Analysis), GLM(广义线性模型, Generalized Linear Model), GAM(广义可加模型, Generalized Additive Model), RF(随机森林模型, Random Forest), CTA(分类回归树模型, Classification and Regression Trees), ME(最大熵模型, Maximum Entropy), SVM(支持向量机模型, Support Vector Machine)等先后涌现。刘晓彤等^[21]以植物物种分布模拟为关键词, 对中国知网、维普网, 以及 Web of Science 文献数据库进行了检索与统计, 结果表明, 物种分布模型在生态学、农业和林业等行业部门应用广泛, 在使用的 33 种模型中, 应用最广的为最大熵模型, 有一半研究的环境数据仅包含气候数据, 另一半研究不仅包含气候数据还包括地形与土壤等数据; 环境及物种数据的来源多样, 国际及本土数据库均得到使用。

上述物种分布模型, 为定量描述湿地植物分布范围、预测潜在分布区等工作提供了有力手段, 在不同类型湿地得到了探索应用。在模拟滨海盐沼湿地植物方面, 夏江宝等^[24]利用广义可加模型(GAM)模拟了翅碱蓬在黄河三角洲的分布概率。宗敏等^[25]利用最大熵模型(MAXENT), 基于千米尺度网格, 在 GIS 平台模拟了芦苇、柺柳和翅碱蓬的潜在分布。陈柯欣等^[26]结合卫星遥感、GIS 空间分析技术和生物种群扩散模型, 分析了黄河三角洲滨海湿地互花米草和碱蓬的动态变化和演变趋势。在模拟淡水湖泊湿地植物方面, 于文琪等^[27]基于 CART 模型, 建立了苔草分布面积和出露时间等水位波动要素的响应关系, Van den Berg 等^[28]则基于多元 Logistic 回归和 GIS, 考虑风速、底泥性质、风力吹程, 水深等因素, 定量模拟了篦齿眼子菜、狐尾藻等 4 种沉水植物在湖泊中的出现概率, 并实现了空间表达。在模拟河流湿地植物方面, 石希等^[29]结合卫星遥感技术提出了一种反演江心洲淹没范围和植被动态的方法, 以四个典型江心洲为例, 分析了三峡工程运用对其植被面积、茂密程度和分布模式的影响。王若男等^[30-31]综合运用 EFDC 水动力学模型、高斯模型, 建立了鄱阳湖湿地植被对淹没水深、淹没时长和退水时间的响应关系, 分析了不同植被对关键水文要素的生态需求和阈值。刘胜琪等^[32-33]考虑了水淹时长和淹没水深对植物生长过程的影响, 改进了物候模型, 并模拟了芦苇在不同淹水条件下的生长, 量化了淹水胁迫对生物量的影响规律。

当前, 物种分布模型存在的主要问题是: 未能将物种的种间关系、迁移扩散能力等关键机理有效纳入到建模过程中, 难以有效表达这两种关键机理的空间信息。此外, 几乎所有物种分布模型都涉及到空间和时间的推, 如根据历史分布、实际分布, 推测气候变化或栖息地人为破坏条件下新的物种时空分布。这种外推方法存在一个重要前提, 即物种对环境条件的响应关系相对恒定。但是, 随着各类研究的不断深入, 这一前提能否成立也需要具体探讨分析, 因为物种本身存在对环境条件的长期适应, 并且通过生长与繁殖权衡, 有性与无性繁殖的权衡调整资源分配方式, 以应对各种环境条件变化。针对这些问题, 李国庆等^[23]综述了物种分布模型的机理支撑, 特别指出了物种分布模型中存在的不足, 提出未来建模过程中应重点考虑物种交互作用及迁移扩散能力, 模拟功能群和群落结构是未来研究的重要方向。Singer 等^[34]、朱媛君等^[17]针对物种分布模型对种间关系考虑不足的问题, 综述了联合物种分布模型(JSDMS)的研究进展, 提出结合隐变量模型(LVMs), 并基于 Laplace 近似和马尔科夫蒙特卡罗模拟, 优化模型相关参数, 用以标准环境因素和生物交互作用, 对现有物种分布模型进一步优化。

除了对模型机理的完善, 不断优化建模过程中的统计学偏差, 是物种分布模型的另一发展方向。许仲林等^[35]特别提出了物种分布模型的优化需求, 提出在模拟中应用集成样本选择模块, 解决模型的过拟合和欠拟合问题。黄敏毅等^[36]评估了抽样偏差、地理信息、出现和缺失标准等统计因素对物种分布模型性能的可能影响, 并基于虚拟物种理论提出了模型改进方法。虚拟物种, 是通过模拟物种对环境变量的响应关系来评估物种在不同环境变量下的出现概率, 并给出虚拟的物种空间分布数据。该方法被广泛用于评估物种特性、抽样偏差、地理信息、出现/缺失标准等对物种分布模型的影响, 是大尺度研究中不可或缺的重要工具, 尤其适用于真实数据和试验手段难以解决的一些问题, 如较大时空尺度的湿地植物种群动态、不同条件下生态过程和种群分布格局的因果关系等。虚拟物种通过构建环境变量与真实分布的拟合关系建立物种分布格局, 数据容易获得、质量可控。

2.3 种群动力学模型 相比统计模型和空间分布模型，种群动力学模型既适用于量化植被的生长、扩张及种间关系，同时能够进一步结合元胞自动机等空间手段，进行空间显示(Spatial Explicit Model)模拟。现阶段，植物个体层次的生长、发育、繁殖、扩散，种群层次的维持、灭绝、占据，以及不同种群种间关系的变化，大时空尺度刻画种群演替动态和时空分布特征都能够通过种群动力学模型实现^[37-39]。

2.3.1 个体生长模拟 在湿地植物个体生长建模工作中，克隆生长(clonal growth)是不能忽略的关键过程(图4)。克隆生长是湿地植物最主要的繁殖扩散方式，也是其应对湿地变化水文条件的形态可塑性表现^[40]，对生态系统功能，如碳，氮和水循环具有重要影响^[41]。

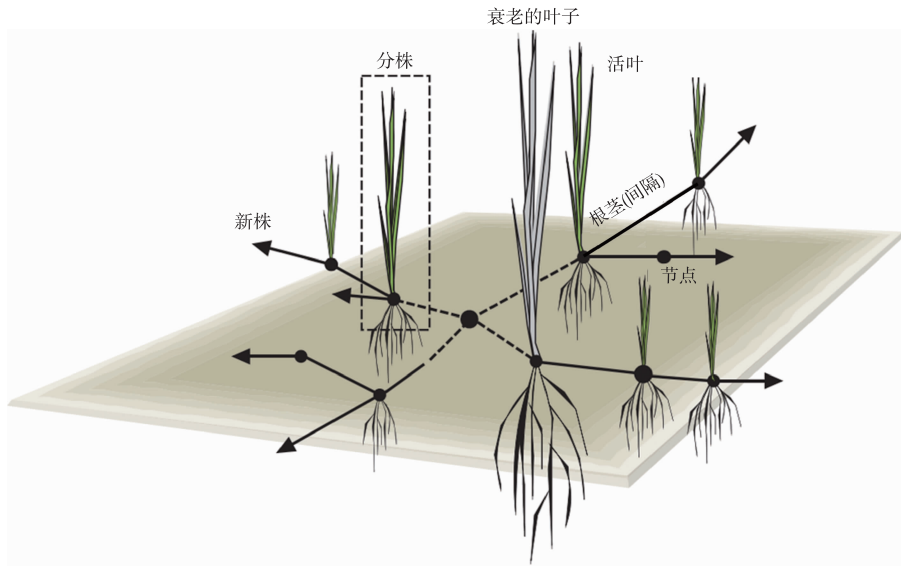


图4 湿生植被克隆繁殖的示意图(改自 Cornelissen 等, 2014)^[41]

Fig.4 Schematic diagram of clone reproduction of wet vegetation(modified from Cornelissen et al., 2014)^[41]

Oborny and Cain 于 1997 年发表了第一篇关于克隆生长模拟的研究综述^[42]。Oborny 等基于器官构型、拓扑结构、空间占居等生物过程，提出了将克隆生长模型整合到空间种群动态模型中的研究途径(图5)，建立了从经典假说到实际分布的模拟手段^[43]。2014 年，Oborny and Hubai 利用基于个体的元胞自动机，验证了植被个体在资源异质性斑块中的趋避、进击、混合策略，及其对应的克隆生长过程(图6)，为模拟研究提供了机理支撑^[44]。

对湿地中的沉水、湿生和挺水植物而言，通过匍匐茎型、根状茎占居生境空斑，是其生长和扩散的主要形式^[45]。最早的沉水植物克隆生长模型，分别是 Van Nes 等^[46]建立的 Charisma 模型，和 Wolfer 等^[47]建立的 Clomo 模型(图7)。二者通过光合、蒸腾、温度、碳源、风浪扰动、底质性质等环境条件，结合萌发、基株产生、分蘖等行为，模拟了沉水植物篦齿眼子菜、轮藻属的生物量分配和克隆整合等生理生态过程，并实现了可视化。Wildova 等^[48]基于受控试验获取的相关数据，模拟了湿生植物苔草属植物的个体生长、资源分配、种内竞争，

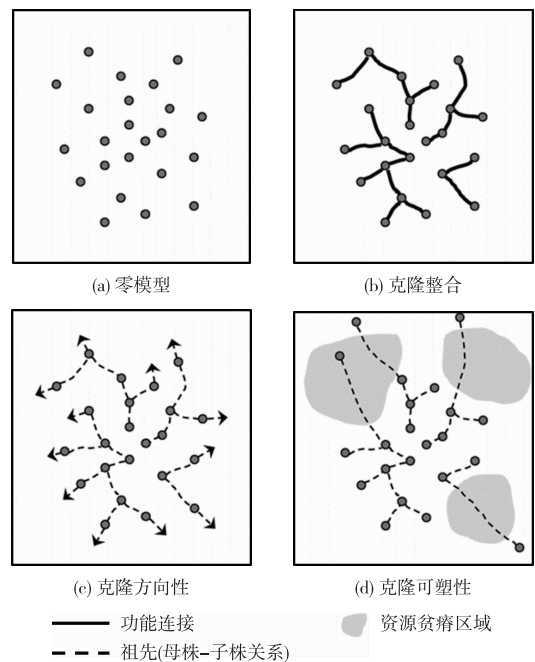


图5 克隆繁殖的空间格局(改自 Oborny 等, 2012)^[43]

Fig.5 Spatial pattern of clone reproduction (modified from Oborny et al., 2012)^[43]

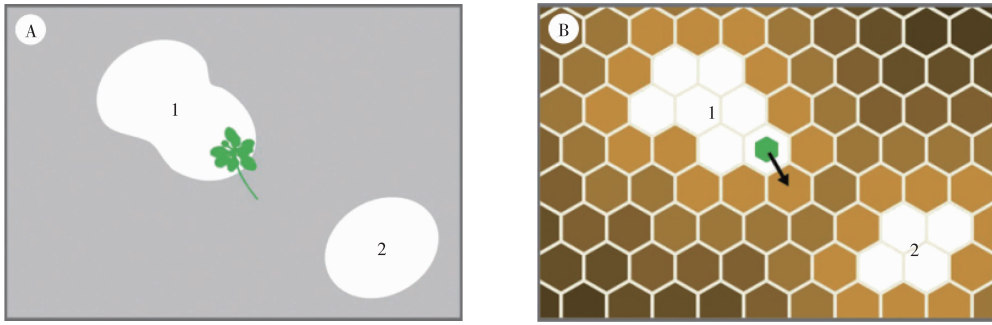


图 6 植被在资源异质性斑块上的扩张过程(改自 Oborny 和 Hubai, 2014)^[44]

Fig.6 Expansion process of vegetation on resource heterogeneity patches (modified from Oborny and Hubai, 2014)^[44]

对植株结构和空间分布格局的影响(图 8)。刘胜琪等^[32-33]基于现有的芦苇生长动态物候模型,构建了一个考虑淹水胁迫的芦苇生长动态物候模型,并以汉口江滩芦苇样地为例,分析了不同淹水条件对芦苇生物量的影响。结果表明,淹水胁迫导致芦苇地生物量显著减小,且与淹没天数和淹没水深有较好的幂函数关系。

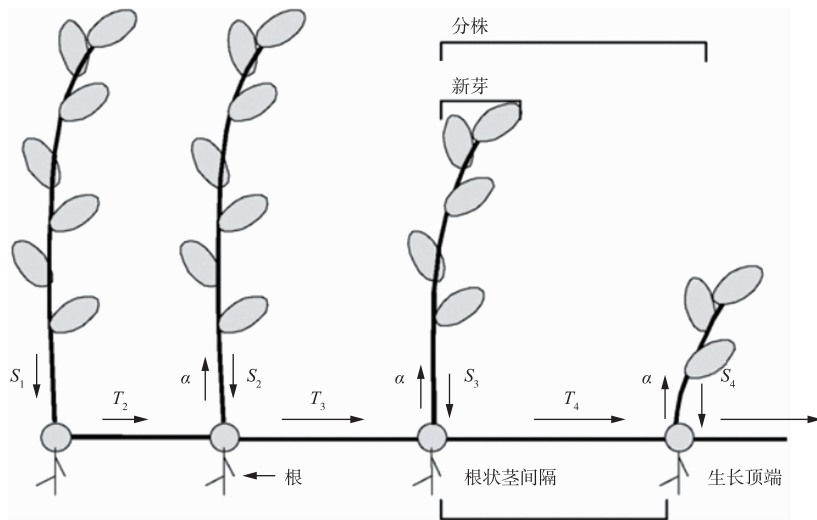


图 7 沉水植物分枝克隆繁殖示意图(改自 Wolfer 等, 2006)^[47]

Fig.7 Schematic diagram of branching, cloning, and reproduction of submerged plants (modified from Wolfer et al., 2006)^[47]

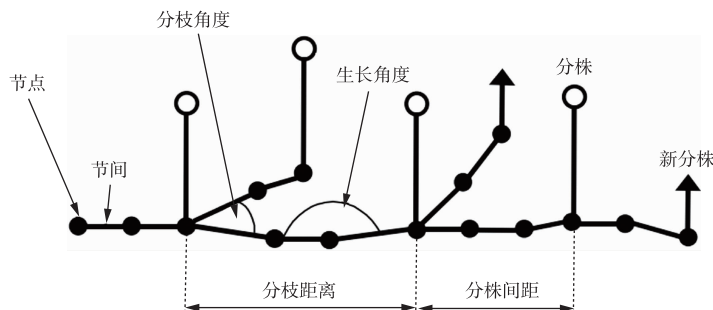


图 8 植被构件结构概念模型示意图(改自 Wildova 等, 2007)^[48]

Fig.8 Schematic diagram of conceptual model of vegetation component structure (modified from Wildova et al., 2007)^[48]

2.3.2 种群扩张模拟 Logistic 方程在模拟湿地植被某种个体生长和某一种群生长过程方面应用广泛,其基本原理是在一定资源禀赋条件下,模拟植被种群随时间的增长动态。Logistic 曲线一般呈“S”型,可通过微分方程求解内禀增长速率 r 和环境容纳量 K (指生物量、株高、密度等指标),从而量化植物生长的基本特征。如丁玲等^[49]通过受控试验,基于 Logistic 模拟了沉水植物菹草在不同光照条件

下的生长过程, 确定了其萌发生长的适宜透明度/水深比值。与之类似, 孟竹剑等^[50]结合鄱阳湖野外固定样方监测数据, 建立了4个高程梯度上湿生植物苔草生物量、株高的 Logistic 生长曲线, 分析了苔草生长节律与越冬雁类的迁飞节律的匹配程度。熊海滨等^[51]建立了考虑淹没频率和淹没水深的水动力生境适宜度数学模型, 用于模拟分析武汉河段汉口边滩南荻芦苇群落的空间分布变化。发现南荻芦苇群落的分布受到三峡水库蓄水后水文条件变化和岸线利用导致的地形变化的双重影响, 其中地形变化的影响占主导地位。Crawford M 等^[52]模拟了淡水潮汐湿地中一年生植物 *Aeschynomene virginica* (吉尼亚田皂角) 的生活史和种群动态, 考虑了环境随机性和水流传播两个因素的影响。结果表明, 环境随机性对植物的长期存活概率有显著影响, 而水流传播对研究区域的植物存活作用不大。Wang Q 等^[53]利用 Stella 软件建立了一个结构动态模型, 模拟了长江口九段沙滩岛上互花米草和芦苇两种植被随着沉积物负荷和分带变化而发生的动态变化。模型基于两种植被在不同高程带的生物相互作用和岛屿形态的变化, 预测了未来十年的植被面积变化趋势。

Logistic 方程虽然能够实现种群扩张过程的数学表达, 但无法处理环境要素的空间异质性及其与种群扩张的交互作用, 因而无法实现种群扩张连续动态的空间直观表达。相比之下, 元胞自动机 (cellular automata, CA) 是一种时间、空间、状态均离散, 空间相互作用和时间因果关系为局部的网格动力学模型, 具有模拟复杂系统时空演化过程的能力。该方法于 20 世纪 40 年代末由 S.Ulan 和 J. von Neumann 提出, 它能够建立局部过程和整体空间格局的关系, 在森林、荒漠、草原等生态系统研究中均有相关应用案例^[54], 在湿地植物生态数值模拟领域也得到了成熟应用。

针对不同水文年对湿地植被分布的影响, Liu 等^[55]基于元胞自动机, 模拟了丰水年、平水年和枯水年莫莫格湿地湿生、挺水植被的扩张, 探索建立了基于植被-水位波动响应规律的适宜水位界定方法, 模拟了适宜水位条件下典型湿地植被的时空分布格局。针对水工程调度运行对湿地植被演替的影响, 叶飞等^[56], 陈求稳等^[57-58]利用元胞自动机模型, 结合经验和半经验公式, 分析了水库运行对下游岸边带植被演替的影响, 并建立了空间显示模型 (Spatial Explicit Model, SEM)。其研究结果表明: 水库运行有利于耐旱植物益母草的生长与扩张, 而不利于湿生植物水蓼的生长, 水位波动对水蓼生长以及维持岸边植物多样性有正面作用。针对滨海湿地入侵植物的扩张动态, 齐相贞等^[59], 刘会玉等^[60]利用元胞自动机模拟了不同景观格局、不同竞争力和关键种群特征的互花米草扩张动态, 定量分析了景观及竞争力对扩张的影响机制。易雨君^[61-62]从理论和方法层面探讨了相关机理, 模拟了不同径流和潮汐作用的土壤水盐条件下, 黄河三角洲盐沼植物的适宜生境和生物量的时空分布。

2.3.3 种间关系模拟 在自然湿地中植被往往以群落形式存在, 通常包含两个及以上种群。种群间的竞争或促进等关系是驱动植被群落结构和空间分布的重要内在机理。Lotka^[63]和 Volterra^[64]于 1920 年代提出了相似的种群竞争模型, 即经典的 Lotka-Volterra 模型, 该模型可以用来描述生态系统中两种竞争种群规模的消长。Lotka-Volterra 模型为理解物种之间的相互作用提供了重要的理论框架。然而, 该模型也存在一些局限性, 例如忽略了环境的时空变异、物种的行为适应、资源的多样性等因素, 导致它们难以适应现在的研究需求。因此, 后续的学者们对这些模型进行了优化调整, 引入了一些新的概念和方法, 使得它们能够更好地描述和预测物种竞争的复杂性和多样性。例如, 1980 年, Tilman^[65]基于植物资源竞争理论提出了资源比假说。该假说认为, 资源是植物生存和生长所必需的, 但在自然环境中往往是有限的, 因此不同物种之间会发生资源竞争 (resource competition)。如果一个物种能够有效地获取并利用某些限制性资源, 它就能在竞争中占据优势, 从而影响植物群落的结构和功能。该假说在森林、草原等陆地生态系统的植物群落中影响较大, 并且在一些高潮盐沼植被植物群落演替研究中也得到了支持^[66-67]。在此基础上, Grime^[68]从植物的生活史对策、竞争策略等方面来阐明植物在不同环境条件下的分布演替, 于 1988 年提出了 C-S-R 理论, 它将植物物种根据其对应的生态位分为三种类型: 竞争型 (C)、应激型 (S) 和扰动型 (R)。这三种类型的植物在不同的环境压力下有不同的适应策略, 从而形成不同的群落结构和功能, 然而, 对于如何调和 C-S-R 理论与资源比假说至今仍有争议。随着 Lotka-Volterra 模型不断完善, 研究先后得到了该模型的滞后效应模型^[69]、功能性反应作

用模型^[70]、反应扩散模型^[71-72]等，这些修正模型考虑到了种群的增长率和环境容纳量的时间效应、非线性繁殖特性、进化过程的时滞效应和随机干扰等因素。He 等^[73-75]研究了扩散速率与空间资源非均匀性对“Lotka-Volterra”竞争-扩散模型动力学行为的影响。结果表明如果物种的资源是非均匀的且分布更集中，空间振荡更小，则在拥有相同的竞争能力和资源总量的情形下，该物种在竞争中具有优势。

传统的种群概念是指在一定时间内占据一定空间的同种生物的所有个体，即种群在空间上是连续分布的。但实际情况种群的分布有很大的可能是斑块状的，每一个斑块占据了一定的空间。而许多斑块构成的更大的空间也是一定的空间。为了区分这两个不同层次的种群概念，一般用局域种群来表示传统意义上的小斑块种群，用集合种群(meta-population)来表示由局域种群所构成的多斑块种群。集合种群指由许多局域种群通过迁移组成的广义种群，是指“一个种群的种群”，更通俗来说，集合种群是由空间上大量离散分布的斑块通过物种迁移和扩散连接而成的种群结合。各子种群具有动态方面的相对独立性和非同步性，每一子种群具有潜在的灭绝率，因此，集合种群不可能在局部形成续存而只能达成局部灭绝与重新侵占的动态平衡。与传统的种群概念相比，集合种群更强调空间上分离的局部种群间的联系和相互作用。同时，集合种群也更加关注种群间的迁移和定居，以及种群灭绝的动态。集合种群研究的核心是将空间看成是由生境斑块构成的网络，探讨这些斑块网络中的多个局域种群的空间结构和动态，这样，种群概念就在一个更高的层次上进行了抽象与概括。伴随集合种群概念的提出，发展出了另一种描述种群空间动态变化的生态学模型，即集合种群模型(Levins 模型)，集合种群模型是由 Levins 在 1969 年提出的，该模型主要处理大量均质斑块网络生境中的种群续存与分布问题，最早用于描述昆虫、爬行动物、两栖动物种群动态模拟研究；2000 年以后，李自珍等^[76]将集合种群概念引入植物种群研究，此后广泛应用于自然或人为导致的破碎化生境中的种群动态模拟，包括荒漠区人工植被、草原和森林等。集合种群模型假设物种的适宜生境以离散斑块形式存在，这些离散斑块可被局域种群占据。该模型最初是用于研究在空间上分离的同一物种的种群，但由于原始模型对种群的假设条件比较苛刻，现实情况下物种很难满足假设条件，因此学者们在模型的基础上，弱化了模型的假设，逐渐拓展出一些适应于应用研究的模型，例如：局域种群大小不同的 Levins 模型(Levins model with different local population sizes)^[77]、大陆岛屿型 Levins 模型(Mainland-island Levins model)^[78]、带有救援效应的 Levins 模型(Levins model with rescue effect)^[79]、考虑生境适应性的扩展 Levins 模型(Levins model with suitable habitats)^[80]等。考虑到局域斑块中往往存在多种物种，物种间存在如竞争、捕食等种间关系，潜在地影响了种群的灭绝和生存，所以 Levins 模型进一步发展成为两个物种相互作用的集合种群模型和多物种相互作用的集合种群模型。例如 Bascompte 等^[81]建立了“捕食者-猎物”Levins 模型(Predator-prey Levins type model)，李自珍等^[76]针对荒漠区人工植被的恢复和重建问题建立了 Levins 集合种群模型，结果表明当物种数为 5 时，空间上随机播种的模拟种样覆盖率达到最大，治沙效果最好。张峰等^[82]建立了三物种循环竞争的集合种群模型，发现局部扩散可以弱化竞争引起的种群振荡，促进物种共存，同时表明 Levins 模型可能低估了共存的条件。陈洁等^[83]将集合种群模型应用于庐山地区的森林演替，选取了 10 个优势乔木种对森林植被群落进行动态模拟。研究表明，庐山森林种群整体向常绿阔叶林方向演替，阔叶树在混生林中占优势。徐娴雅等^[84]基于集合种群理论生态模型，模拟设计了垂直森林生态社区格局，用于掌握城市绿地生态系统中植物种群维持的必要条件。

在模拟植被种间关系方面，元胞自动机模型也得到了实践应用^[37,62]。其原理为：首先将空间划分为一定数量的网格单元，每个单元只能是空白或被个体占据两种状态，采用摩尔近邻模式(Moore neighborhood)网格，摩尔近邻模式网格是元胞自动机的一种网格划分方法^[37]，由爱德华·F·摩尔(Edward F. Moore)提出。它指的是在二维格子中，每个细胞的邻居包括周围的八个细胞，这种模式用于定义细胞的状态更新规则。二维的元胞自动机通常将平面分成许多四方形、六边形或三角形网格。其中四方形网格近邻的选择有三种模式，如图 9 所示的冯诺伊曼近邻、3×3 网格的摩尔近邻以及大于 3×3 网格的扩展摩尔近邻。其中，冯诺伊曼近邻由一个中心元胞(即将演化的元胞)和 4 个位于其临近

东西南北方位的元胞组成，共包含 5 个元胞；摩尔近邻由一个中心元胞(即将演化的元胞)和位于其周围的 8 个相邻元胞组成。

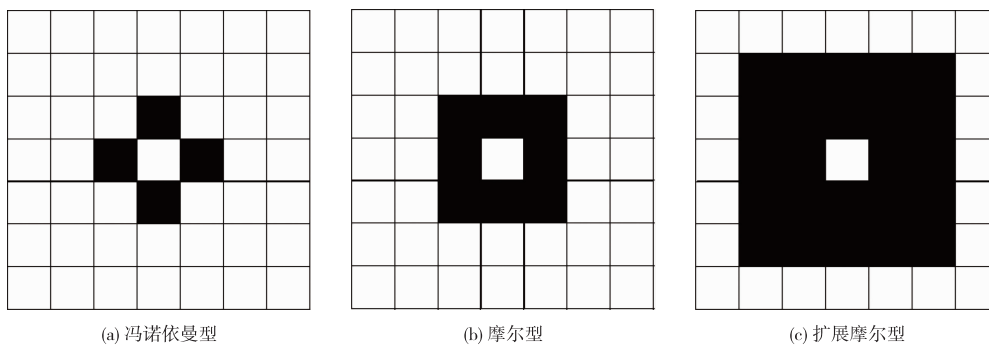


图 9 元胞自动机近邻模式
Fig.9 Cellular automaton near neighbor mode

两个个体为了争夺一个单元格而发生竞争，物种的竞争能力和胁迫忍耐能力存在权衡。假设物种 i 的竞争能力为 p_i ($0 \leq p_i \leq 1$)，则当物种 i 的繁殖体扩散到物种 j 占用的单元格时，物种 i 是否排除物种 j 取决于 $p_i - p_j$ 的大小。Qi^[85-86] 针对黄河三角洲植被进行了盐沼湿地植被的演替模拟及空间表达，种群动态和种间关系，通过模型，验证了 SGH (Stress Gradient Hypothesis) 环境胁迫梯度假说，即互利的强度或重要性随着环境胁迫度的增加增加，竞争在低胁迫环境中起主导作用，互利则在高胁迫环境中起着更重要的作用。刘华等^[87] 基于外来植物物种与本地植物物种的竞争关系，建立了考虑水资源代谢库和空间扩散的生态数学模型，发现扩散作用降低了外来植物物种的空间聚集程度。孙靖尧等^[88] 结合 Logistic 生长曲线与元胞自动机建立了考虑局域个体相互作用的空间显示模型，发现资源分布各向异性、稀缺性、种群拓殖和竞争的影响是植被规则格局呈现出点状、谜图状、缺口状和条带状等类型的成因。

3 存在不足与发展方向

通过分类总结湿地植被模拟的类型与目标，可以梳理出湿地植被模拟的主要历程及趋势，以明确未来研究方向。

3.1 存在不足

(1) 当前，“环境条件-湿地植被”的定量关系仍处于松散耦合阶段。水文、水质及水动力条件，是决定湿地植被形成、发育和演替的关键环境因子。量化这些因子，在小尺度可以根据野外样方调查获取；但在河湖整体尺度上，则必须通过分布式水文模型 (SWAT、HSPF 等)、水动力水质模型 (WASP、EFDC、MIKE、AQUATOX、CAEDYM 等)，以及湖泊生态动力学模型 (如 PCLAKE, AQUATOX 等)，首先输出水位、淹水时间、营养盐浓度、透明度、叶绿素等关键环境因子，再通过经验或半经验公式，实现“环境条件-湿地植被”的松散耦合。耦合关系中湿地植被的表征指标，主要是种群生物量，株高，密度等生长指标，和多样性、丰富度、均匀度等群落结构指标。环境条件与植被响应的定量关系大多基于统计模型建立，个体、种群、群落对环境条件的适应性机理仍然有待进一步明晰。

(2) 环境条件模块与植被模块时空不匹配问题普遍存在。相比水动力、水文和水质等环境条件模块输出的时空连续指标，植被模块较为简单，定量指标多为静态，实践中往往采用样方调查获取的生物量，盖度，密度，株高等指标，或反映群落组成结构的多样性，均匀度等简单定量指标，虽然可通过野外调查，或遥感解译获取植被分布面积、NDVI、EVI 等指数，体现生态需求的时空异质性和季节性变化特征，但仍然无法使生态和水文模块的时空尺度进行匹配。例如，湿地植被个体的萌发、定植、生长、繁殖、凋落，其种群的竞争、扩散、空间分布和基因延续等生态过程，无不受到水文过程的影响，难以通过空间格局变化、单一数值或几个连续数值区间进行反映。

(3) 湿地植被生活史过程的机理融合仍然存在短板。湿地植被生态过程对水文、水质^[89]及水动力^[90-91]等环境条件的响应机理仍存在诸多难以描述的难点,在个体层次,湿地植物通过调节茎秆长度增强淹水条件的呼吸作用,通过地上部分休眠减少淹水期间的生物量消耗;通过增大种子数量,减轻种子质量促进其水流传播以完成基因延续等,反映了湿地植物通过优化资源分配策略来抵御胁迫,度过不利环境的形态学响应机理;在种群和群落层次,不同种群沿环境梯度上的“竞争-促进”关系及其相互转化;同一种群内部由于资源禀赋发生密度制约,造成物种的自疏效应;种间关系在发生变化后,共存的若干个种群,将在何种时间尺度上,演替形成何种群落结构,群落稳定性如何?均反映了湿地植物在不同时间跨度和空间尺度的短期响应及长期适应机制。在水文过程驱动下,植物个体形态学的短期响应,种间竞争-促进等关系的年际和年内变化,群落结构的长时间演替等会发生何种变化?三者之间有何关系?是否存在空间自相似等复杂系统组织特征?上述不同尺度的生态过程,又是怎样塑造了湿地水陆交错带植被条带状分布和镶嵌状分布兼具,湿生和水生植物空间重叠等特殊现象?这些问题均需在机理层面有更加深刻的认识。

3.2 未来发展方向 针对上述不足,从重点关注对象、体现湿地特点的建模框架,以及完善湿地植被生活史机理支撑等 3 个方面总结未来发展方向。

(1) 进一步聚焦水工程调度运行对湿地植被的影响。从研究区域上,当前湿地植被模拟多集中于长江河口、黄河河口等滨海盐沼湿地;从研究对象上,多集中于入侵植物扩散预测、入侵种与本地种的种间关系变化等;相比之下,对于内陆河湖湿地植被模拟涉及较少。截至 2021 年,我国已建成 9.8 万余座水库,水库调度运行深刻改变了河湖水文过程、水动力过程和地貌过程,下游湿地植被的水、土、光等生态因子均发生显著变化,群落结构与空间分布的变化在所难免。从生态功能上看,湿地植被是湿地生态系统最重要的初级生产者、是鱼类、底栖动物的庇护所,也是越冬候鸟的食物资源。以鱼类产卵场及鸟类栖息地为保护目标,应在当前“水-鱼”或“水-鸟”关系基础上,模拟植被演替及空间格局,打通“水-草-鸟-鱼”关系链条,更好地理解 and 揭示水文过程变化的湿地响应机制,提出维持生态良好的适宜生态水文过程(水位、流量等),为湖泊湿地生态水文过程调控、生态补水等工程手段提供科学依据。当今,美国陆军工程兵团水文工程中心在已开发的 HEC-RAS 河道二维水动力基础上,开发出了比较成熟的植被模拟模块(RVSM 模块),应用于河岸植被的生命周期模拟,包括种子扩散、植物生长和死亡等,以及对动态水力条件的响应,国内尚且没有成熟的模型可以实现这一功能,有关模型开发方面仍需要不断探索。

(2) 进一步构建反映湿地水文特点的建模框架。湿地水文过程复杂,水沙、水热、水盐梯度条件多样,“过渡性”或称“边缘效应(edge effect)”是其最为显著的特点。从水文条件看,湿地有一般水生生物所不能适应的周期性干旱,也有一般陆生植物所不能耐受的长期淹水。无论是无机环境,还是生物群落,都反映了这种过渡性。湿地植被是湿地特殊生境的产物,例如,许多湿生植物都具有适应半水半陆、干湿交替生境的特征,具备发达的通气组织和快速的形态可塑性。而纵观当前各类湿地植被模型,无论是个体生长、种群分布还是群落结构,大多源自陆生植被模型、景观模型和生态动力学模型,尚不足以全面反映湿地环境条件特点,以及湿地植物的各种“两栖”适应性特征。

(3) 进一步结合生态学经典理论完善湿地植被模拟的机理支撑。湿地植被普遍沿水分梯度环带状分布,植物种间竞争能力的差异可能是决定这一特征的主要原因。但是,种间关系及作用强度随环境条件变化并非一成不变。如经典的胁迫梯度假说(stress gradient hypothesis, SGH)认为:植物间的竞争和促进作用在一定程度上取决于植物所处外界环境的压力强度。在外界环境压力较小时,植物间关系多为竞争作用,但随着环境压力的增加,竞争作用便会减弱,而促进作用则相应增强。如何在模拟中将水文情势变化(外因)与植被的种间关系(内因)耦合起来,并且选取适宜尺度与机理试验进行验证,是湿地植被模拟的发展方向。

4 未来湿地植物生态数值模拟框架—以鄱阳湖为例

4.1 鄱阳湖湿地植物现状特征及存在问题 鄱阳湖(东经 115°49′—116°46′、北纬 28°24′—29°46′)是

我国面积最大的淡水湖泊湿地，湖区承纳赣江、抚河、信江、饶河、修河五大江河(以下简称“五河”)及博阳河、漳田河、潼津河等区间来水，经调蓄后由湖口注入长江，是一个过水性、吞吐型、季节性通江湖泊，也是长江流域生态系统的重要组成部分^[92]。

受水文节律影响，鄱阳湖湿地植被形成了特定的“水位-高程-植被”分布格局，植被沿高程梯度呈条带状分布，从高到低依次为：中生植被如狗牙根和牛鞭草等，挺水植被如芦苇、南荻等，湿生植被如苔草、藨草、蓼子草等，浮叶植被如菱、荇菜等，以及沉水植被如苦草和黑藻等(图 10)。近十几年来，受水文情势变化和湖区人类活动影响，鄱阳湖湿地植被群落结构和空间分布变化显著，主要表现为：中生植物狗牙根、牛鞭草不断入侵 14 m 高程以上滩地，形成斑块状和条带状草甸；湿生、挺水植物向 9~10 m 高程的浅水区扩张近 1~2 m，挤占沉水、浮叶植被分布空间；水生植被主要是沉水植被的面积大幅缩减。

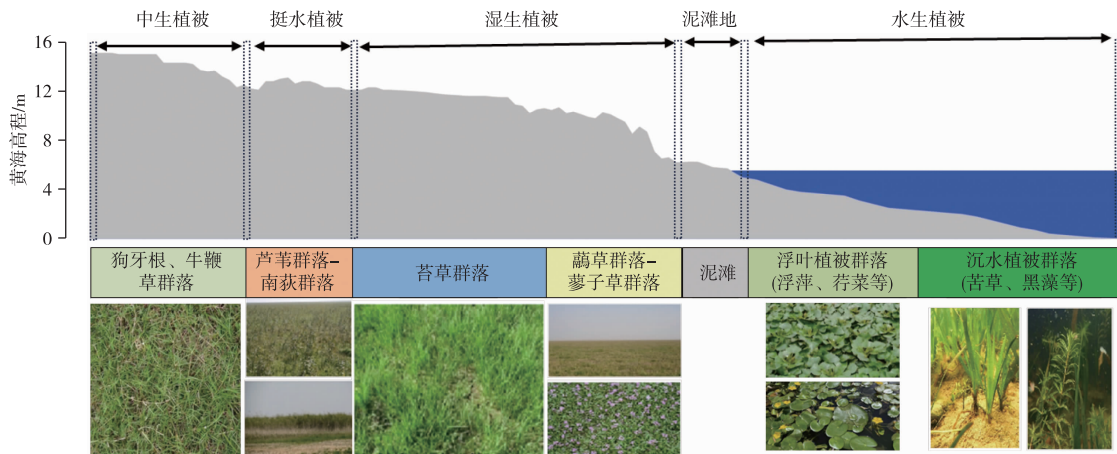


图 10 鄱阳湖湿地植被空间分布特征示意图

Fig.10 Schematic diagram of wetland plants distribution characteristics in Poyang Lake wetland

4.2 鄱阳湖湿地植被模拟框架 鄱阳湖湿地植物生态数值模拟的目标应聚焦预测江湖关系变化下植被的群落结构演变及空间格局变化，为鱼类产卵场、鸟类栖息地的刻画等提供重要支撑。但当前研究仍然集中在定性分析演变趋势、通过遥感反演湿地植被时空格局，以及基于水动力模型和统计学模型计算植被演变的生态阈值等三类。如胡振鹏等^[93]基于 1983 和 2013 年两次鄱阳湖综合科学考察的植被调查数据，建立了鄱阳湖水生植被退化概念框架模型。蔺亚玲等^[94]融合了 Landsat 和 MODIS 数据源，通过结合物候特征构建的决策树分类方法，模拟了 2000—2020 年鄱阳湖湿地植被时空演变，结果表明植被总面积整体上呈现出增加的趋势，特别是“蓼子草-藨草”群落的增加最为明显。韩祯等^[19]在耦合水动力模型和生态阈值模型方面开展了创新探索，明晰了不同淹水时长梯度下，鄱阳湖湿地植被最适宜、适宜和不适宜的生态阈值区间，定量揭示了水文过程变化下鄱阳湖湿地植被演替成因。但是，上述研究仍未能回答水文过程变化下植物个体、种群、以及种间关系如何变化等生态学机理问题，以及这些机理如何有效指导植物空间分布格局的模拟，亟需在这两个层面进行强化。

4.2.1 机理层面：基于通江湖泊独特水文过程，强化生态学机理支撑 鄱阳湖特殊的水文情势，决定其成为江湖关系及生态效应研究的“原型试验场”。鄱阳湖丰枯水位变幅高达 20 m，洲滩反复淹露，湿地植物在长期进化过程中逐渐形成独特的适应性策略。2003 年后，随江湖关系变化，湿生和中生植物扩张下移，水生植物不断退化等现象背后蕴含了两个关键生态学机理：一是在变化水文情势下个体的适应策略，如生物量在生长和繁殖之间、在有性繁殖和无性繁殖之间的分配特征；以及个体如何通过调整光合作用和呼吸作用来适应周期性的淹水和干旱等环境条件；二是在种群和群落层面，水文情势对多个物种稳定共存或者竞争排斥的作用机理。这些问题必须结合野外定位监测和室内控制试验，通过合理设置水深、涨退水速率、淹水时间等控制梯度进行观测，为空间分布格局的模拟提供生长、繁殖、竞争等生态过程的关键参数(图 11)。

4.2.2 应用层面：聚焦江湖关系变化，刻画植被演替动态及空间格局 未来江湖关系变化主要包括两种情景：一是江湖关系持续演变情景，鄱阳湖秋季退水将更加提前，洲滩淹水时间较现状更短，枯水期水位较同时段更低；二是规划建设的鄱阳湖水利枢纽调控情景，枢纽按照 2003 年前的多年平均水文节律对秋季退水过程进行调控，水位消落恢复至 1956—2002 年的多年平均状态。首先，构建两种情景下的水动力模型，分别计算不同情景下的淹水时长、水深、洲滩出露时机关键水文因子。针对个体生长和种群扩张，应结合机理试验的研究结果，将表征植物生长繁殖的关键参数整合到 Logistic 模型中，模拟个体生长规律与种群空间分布。

针对群落结构的演变，同理应结合竞争试验的研究结果，利用 Lotka-Volterra 模型模拟不同水文节律情景下植物种群竞争排斥或者稳定共存的状态，并刻画湿地植被群落结构的时空分布特征(图 11)。在此基础上，结合鱼类产卵、鸟类越冬觅食等敏感生态保护目标的水文需求，建立“水-草-鸟-鱼”关系链条，模拟不同水文节律下的生境时空动态，为确定江湖关系变化下的适宜生态水文过程提供科学依据。

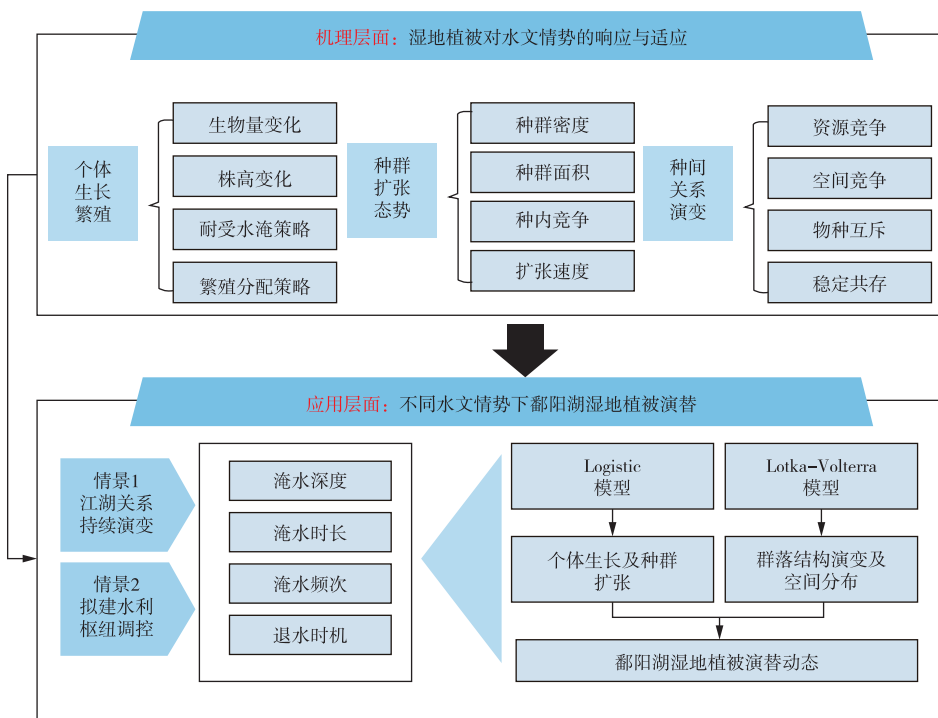


图 11 鄱阳湖湿地植物生态数值模拟框架

Fig.11 The numerical modelling framework for wetland plants ecology in Poyang Lake wetland

5 结论

(1)按照模型对生态机理及空间格局刻画的程度，湿地植物生态模拟的数学模型可分为统计模型、物种分布模型和种群动力学模型 3 种类型。其中，统计模型主要建立环境条件和植被分布的线性或非线性回归关系；物种分布模型则聚焦研究湿地植物的时空分布格局及其对气候变化和水文过程的响应；种群动力学模型考虑了植物生长、繁殖、竞争等过程，还能结合元胞自动机等模拟手段实现空间显示模拟。

(2)“环境条件-湿地植被”的定量关系的研究仍处于松散耦合阶段，尽管可以通过野外调查或遥感技术获取植被分布的时空异质性特征，但仍无法完全匹配环境条件(如水文过程)的时空尺度；此外，湿地植物对环境条件的响应机理复杂，包括个体层次的形态学响应和种群及群落层次的适应，当前这些机理认识仍然有限，亟待开展进一步研究。

(3)以典型通江湖泊湿地——鄱阳湖为对象,从机理层面和应用层面提出下一步研究方向。在机理层面,应基于通江湖泊独特水文过程,重点探讨鄱阳湖湿地植被生长、繁殖、竞争等生活史对策和分布格局与水文过程的关系;在应用层面,应聚焦江湖关系变化和水利工程调度的水文过程变化,深度耦合水动力模型和种群生态学模型,模拟湿地植被的演替动态及空间格局。

参 考 文 献:

- [1] ARTHAUD F, VALLOD D, ROBIN J, et al. Eutrophication and drought disturbance shape functional diversity and life-history traits of aquatic plants in shallow lakes[J]. *Aquatic Sciences*, 2012, 74(3): 471-481.
- [2] AGNIHOTRI K, SHARMA N. Developments in ecological modeling based on cellular automata[J]. *Innov. Syst. Des. Eng.*, 2015(6): 75-78.
- [3] BERTNESS M D, CALLAWAY R. Positive interactions in communities[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1994, 9(5): 191-193.
- [4] CALLAWAY R M. Positive interactions among plants[J]. *the Botanical Review*, 1995(61): 306-349.
- [5] CALLAWAY R M, WALKER L R. Competition and facilitation: a synthetic approach to interactions in plant communities[J]. *Ecology*, 1997, 78(7): 1958-1965.
- [6] CALLAWAY R M, BROOKER R W, CHOLER P, et al. Interdependence among alpine plants increases with stress: a global experiment[J]. *Nature*, 2002(417): 844-848.
- [7] VALIENTE-BANUET A, VERDÚ M. Facilitation can increase the phylogenetic diversity of plant communities[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(11): 1029-1036.
- [8] GROSS J J. Emotion regulation[J]. *Handbook of Emotions*, 2008, 3(3): 497-513.
- [9] STOLL P, BERGIUS E. Pattern and process: competition causes regular spacing of individuals within plant populations[J]. *Journal of Ecology*, 2005: 395-403.
- [10] TRAVIS J M J, BROOKER R W, CLARK E J, et al. The distribution of positive and negative species interactions across environmental gradients on a dual-lattice model[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2006, 241(4): 896-902.
- [11] TRAVIS S E, HESTER M W. A space-for-time substitution reveals the long-term decline in genotypic diversity of a widespread salt marsh plant, *Spartina alterniflora*, over a span of 1500 years[J]. *Journal of Ecology*, 2005, 93(2): 417-430.
- [12] BROOKER R W, MAESTRE F T, CALLAWAY R M, et al. Facilitation in plant communities: the past, the present, and the future[J]. *Journal of Ecology*, 2008: 18-34.
- [13] JIA Y, HUANG H, SUN G X, et al. Pathways and relative contributions to arsenic volatilization from rice plants and paddy soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(15): 8090-8096.
- [14] ZHANG Y, ZHANG F, LI X, et al. Transcription activator-like effector nucleases enable efficient plant genome engineering[J]. *Plant Physiology*, 2013, 161(1): 20-27.
- [15] AUSTIN M P. Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 157(2/3): 101-118.
- [16] GUI SAN A, ZIMMERMANN N E. Predictive habitat distribution models in ecology[J]. *Ecological Modelling*, 2000, 135(2/3): 147-186.
- [17] 朱媛君, 山丹, 张晓, 等. 揭示群落结构及其环境响应的联合物种分布模型的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4217-4225. (ZHU Yuanjun, SHAN Dan, ZHANG Xiao, et al. Advances in joint species distribution models to reveal community structure and its environmental response[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 4217-4225. (in Chinese))
- [18] 崔保山, 贺强, 赵欣胜. 水盐环境梯度下翅碱蓬(*Suaeda salsa*)的生态阈值[J]. *生态学报*, 2008(4): 1408-1418. (CUI Baoshan, HE Qiang, ZHAO Xinsheng. Researches on the ecological thresholds of *Suaeda salsa* to the environmental gradients of water table depth and soil salinity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1408-1418. (in Chinese))
- [19] 韩祯, 王世岩, 刘晓波, 等. 基于淹水时长梯度的鄱阳湖优势湿地植被生态阈值[J]. *水利学报*, 2019, 50(2): 252-262. (HAN Zhen, WANG Shiyan, LIU Xiaobo, et al. Ecological thresholds for the dominated wet-

- land plants of Poyang Lake along the gradient of flooding duration[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(2): 252-262. (in Chinese))
- [20] 朱源, 康慕谊. 排序和广义线性模型与广义可加模型在植物种与环境关系研究中的应用[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(7): 807-811. (ZHU Yuan, KANG Muyi. Application of ordination and GLM/GAM in the research of the relationship between plant species and environment[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(7): 807-811. (in Chinese))
- [21] 刘晓彤, 袁泉, 倪健. 中国植物分布模拟研究现状[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(4): 273-283. (LIU Xiaotong, YUAN Quan, NI Jian. Research advances in modelling plant species distribution in China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2019, 43(4): 273-283. (in Chinese))
- [22] 宋创业, 黄翀, 刘庆生, 等. 黄河三角洲典型植被潜在分布区模拟——以翅碱蓬群落为例[J]. *自然资源学报*, 2010(4): 677-685. (SONG Chuangye, HUANG Chong, LIU Qingsheng, et al. Simulation of Suaeda heteroptera potential distribution in the Yellow River Delta by using generalized additive models[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(4): 677-685. (in Chinese))
- [23] 李国庆, 刘长成, 刘玉国, 等. 物种分布模型理论研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(16): 4827-4835. (LI Guoqing, LIU Changcheng, LIU Yuguo, et al. Advances in theoretical issues of species distribution models[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(16): 4827-4835. (in Chinese))
- [24] 夏江宝, 许景伟, 李传荣, 等. 黄河三角洲退化刺槐林地的土壤水分生态特征[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(6): 75-80. (XIA Jiangbao, XU Jingwei, LI Chuanrong, et al. Ecological characteristics of soil moisture in degraded Robinia pseudacacia plantation in Yellow River Delta area[J]. *Bull. Soil Water Conserv.*, 2010, 30(6): 75-80. (in Chinese))
- [25] 宗敏, 韩广轩, 栗云召, 等. 基于 MaxEnt 模型的黄河三角洲滨海湿地优势植物群落潜在分布模拟[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(6): 1833-1842. (ZONG Min, HAN Guangxuan, LI Yunzhao, et al. Predicting the potential distribution of dominant species of the coastal wetland in the Yellow River Delta, China using MaxEnt model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 28(6): 1833-1842. (in Chinese))
- [26] 陈柯欣, 丛丕福, 曲丽梅, 等. 黄河三角洲互花米草、碱蓬种群变化及扩散模拟[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(1): 128-134. (CHEN Kexin, CONG Pifu, QU Limei, et al. Simulation of dynamic changes and diffusion of typical vegetation populations in coastal wetlands in the Yellow River Delta[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2021, 57(1): 128-134. (in Chinese))
- [27] 于文琪, 戴雪, 杨颖, 等. 基于 CART 模型的鄱阳湖草滩苔草分布与水位波动要素关系[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(6): 1672-1680. (YU Wenqi, DAI Xue, YANG Ying, et al. The relationship between water-level fluctuation factors and the distribution of *Carex* in floodplain grassland around Poyang Lake[J]. *Lake Sci.*, 2018, 30(6): 1672-1680. (in Chinese))
- [28] VAN DEN BERG M S, SCHEFFER M, VAN NES E, et al. Dynamics and stability of *Chara* sp. and *Potamogeton pectinatus* in a shallow lake changing in eutrophication level[J]. *Hydrobiologia*, 1999(408): 335-342.
- [29] 石希, 夏军强, 周美蓉, 等. 三峡工程运用后长江中游典型江心洲植被动态变化趋势及机制探析[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(6): 2036-2047. (SHI Xi, XIA Junqiang, ZHOU Meirong, et al. Investigation on vegetation dynamics of mid-channel bars in the middle Yangtze River in response to the operation of the Three Gorges Project[J]. *Lake Sci.*, 2023, 35(6): 2036-2047. (in Chinese))
- [30] 王若男, 刘晓波, 韩祯, 等. 鄱阳湖湿地典型植被对关键水文要素的响应规律研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2021, 19(5): 482-489. (WANG Ruonan, LIU Xiaobo, HAN Zhen, et al. Study on the response law of typical wetland vegetation communities to key hydrological elements in Poyang Lake[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2021, 19(5): 482-489. (in Chinese))
- [31] 王若男, 彭文启, 刘晓波, 等. 鄱阳湖南矶湿地典型植被对水深和淹没频率的响应分析[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2018, 16(6): 528-535. (WANG Ruonan, PENG Wenqi, LIU Xiaobo, et al. Analysis of responses of typical vegetation in Nanji Wetland National Nature Reserve of Poyang Lake to water depth and submergence frequency[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2018, 16(6): 528-535. (in Chinese))
- [32] 刘胜琪, 夏军强, 周美蓉, 等. 考虑淹水胁迫条件下的汉口江滩芦苇生长动态模拟[J]. *水资源保护*,

- 2023, 39(5): 178–185.
- [33] 刘胜琪, 夏军强, 周美蓉, 等. 考虑淹水胁迫条件下的汉口江滩芦苇生长动态模拟[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 178–185. (LIU Shengqi, XIA Junqiang, ZHOU Meirong, et al. Dynamic simulation of *Phragmites australis* growth in Hankou foodplain considering fooding stress[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 178–185. (in Chinese))
- [34] SINGER A, JOHST K, BANITZ T, et al. Community dynamics under environmental change: How can next generation mechanistic models improve projections of species distributions? [J]. Ecological Modelling, 2015(326): 63–74.
- [35] 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法[J]. 生态学报, 2015, 35(2): 557–567. (XU Zhonglin, PENG Huanhua, PENG Shouzhang. The development and evaluation of species distribution models [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 557–567. (in Chinese))
- [36] 黄敏毅, 孔晓泉, 段仁燕, 等. 虚拟物种的基本原理及其在物种分布模型评估中的应用[J]. 生态学报, 2016, 36(9): 2460–2470. (HUANG Minyi, KONG Xiaoquan, DUAN Renyan, et al. The basic principle of virtual species and its application to evaluations of species distribution models[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(9): 2460–2470. (in Chinese))
- [37] 林振山. 种群动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (LIN Zhenshan. Population Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [38] 张育新, 马克明, 牛树奎. 异质种群动态模型: 破碎化景观动态模拟的新途径[J]. 生态学报, 2003, 23(9): 1877–1890. (ZHANG Yuxin, MA Keming, NIU Shukui. Metapopulation dynamic models: A novel approach to fragmented landscape dynamics[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(9): 1877–1890. (in Chinese))
- [39] 张炜平, 潘莎, 贾昕, 等. 植物间正相互作用对种群动态和群落结构的影响: 基于个体模型的研究进展[J]. 植物生态学报, 2013, 37(6): 571–582. (ZHANG Weiping, PAN Sha, JIA Xin, et al. Effects of positive plant interactions on population dynamics and community structures: a review based on individual-based simulation models[J]. Journal of Plant Ecology, 2013, 37(6): 571–582. (in Chinese))
- [40] 张玉芬, 张大勇. 克隆植物的无性与有性繁殖对策[J]. 植物生态学报, 2006, 30(1): 174–183. (ZHANG Yufen, ZHANG Dayong. Asexual and sexual reproductive strategies in clonal plants[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2006, 30(1): 174–183. (in Chinese))
- [41] CORNELISSEN J H C, SONG Y B, YU F H, et al. Plant traits and ecosystem effects of clonality: A new research agenda[J]. Annals of Botany, 2014, 114(2): 369–376.
- [42] OBORNY B. Models of spatial spread and foraging in clonal plants[J]. the Ecology and Evolution of Clonal Plants, 1997: 155–183.
- [43] OBORNY B, MONY C, HERBEN T. From virtual plants to real communities: a review of modelling clonal growth [J]. Ecological Modelling, 2012(234): 3–19.
- [44] OBORNY B, HUBAI A G. Patch size and distance: modelling habitat structure from the perspective of clonal growth[J]. Annals of Botany, 2014, 114(2): 389–398.
- [45] 符辉, 袁桂香, 曹特, 等. 洱海近 50a 来沉水植被演替及其主要驱动要素[J]. 湖泊科学, 2013, 25(6): 854–861. (FU Hui, YUAN Guixiang, CAO Te, et al. Succession of submerged macrophyte communities in relation to environmental change in Lake Erhai over the past 50 years[J]. Journal of Lake Science, 2013, 25(6): 854–861. (in Chinese))
- [46] VAN NES E H, SCHEFFER M, VAN DEN BERG M S, et al. Charisma: a spatial explicit simulation model of submerged macrophytes[J]. Ecological Modelling, 2003, 159(2/3): 103–116.
- [47] WOLFER S R, VAN NES E H, STRAILE D. Modelling the clonal growth of the rhizomatous macrophyte *Potamogeton perfoliatus*[J]. Ecological Modelling, 2006, 192(1/2): 67–82.
- [48] WILDOVA R, GOUGH L, HERBEN T, et al. Architectural and growth traits differ in effects on performance of clonal plants: an analysis using a field-parameterized simulation model[J]. Oikos, 2007, 116(5): 836–852.
- [49] 丁玲, 李巍, 施蓓, 等. 透明度胁迫对菹草 (*Potamogeton crispus*) 生长的定量影响及其生长动力学模型[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 92–96. (DING Ling, LI Wei, SHI Bei, et al. Effects of water transparency on *Potamogeton crispus* growth and its dynamic model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 92–96. (in Chinese))

nese))

- [50] 孟竹剑, 夏少霞, 于秀波, 等. 鄱阳湖越冬雁类食源植被适宜取食时间窗口[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7539-7548. (MENG Zhujian, XIA Shaoxia, YU Xiubo, et al. A study on the suitable time window of feeding vegetation fit for overwintering geese in Poyang Lake[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): 7539-7548. (in Chinese))
- [51] 熊海滨, 孙昭华, 陈立, 等. 水文与岸滩变化对滨岸带南荻—芦苇群落适宜生境的影响——以长江武汉河段为例[J]. 湖泊科学, 2022, 34(4): 1250-1261. (XIONG Haibin, SUN Zhaohua, CHEN Li, et al. Influence of hydrological and morphological changes on the habitats of *Miscanthus lutarioriparius* and *Phragmites australis* in a river flood plain: A case study of Wuhan reach of the Yangtze River[J]. Lake Sci., 2022, 34(4): 1250-1261. (in Chinese))
- [52] CRAWFORD M, DAVIES S, GRIFFITH A. Predicting metapopulation responses of a tidal wetland annual to environmental stochasticity and water dispersal through an individual-based model[J]. Ecological Modelling, 2015, 316: 217-229.
- [53] WANG Q, JØRGENSEN S E, LU J, et al. A model of vegetation dynamics of *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis* in an expanding estuarine wetland: Biological interactions and sedimentary effects[J]. Ecological Modelling, 2013, 250: 195-204.
- [54] 柯新利, 邓祥征, 何书金. 地理元胞自动机模型的尺度敏感性及其原因[J]. 地理研究, 2010, 29(5): 863-872. (KE Xinli, DENG Xiangzheng, HE Shujin. Scale sensitivity and its causality for Geo-cellular Automata modelling[J]. Geographical Research, 2010, 29(5): 863-872. (in Chinese))
- [55] LIU Q, LIU J, LIU H, et al. Vegetation dynamics under water-level fluctuations: Implications for wetland restoration[J]. Journal of Hydrology, 2020, 581: 124418.
- [56] 叶飞, 陈求稳, 吴世勇, 等. 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[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2604-2613. (YE Fei, CHEN Qiuwen, WU Shiyong, et al. Spatially-explicit modelling of riparian vegetation dynamics under reservoir operations[J]. 2008, 28(6): 2604-2613. (in Chinese))
- [57] 陈求稳, 韩瑞, 叶飞. 水库运行对下游岸边带植被和鱼类的影响[J]. 水动力学研究与进展, 2010, 25(1): 85-92. (CHEN Qiuwen, HAN Rui, YE Fei. Impacts of reservoir regulations on the downstream riparian vegetation and fish dynamics[J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 25(1): 85-92. (in Chinese))
- [58] 陈求稳. 生态水力学及其在水利工程生态环境效应模拟调控中的应用[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 413-423. (CHEN Qiuwen. Discipline of ecohydraulics and the application to modeling and mitigating eco-environmental effects of hydraulic works[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 413-423. (in Chinese))
- [59] 齐相贞, 林振山, 刘会玉. 竞争和景观格局相互作用对外来入侵物种传播影响的动态模拟[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 569-579. (QI Xiangzhen, LIN Zhenshan, LIU Huiyu. Dynamic modeling of the interactive effects of competition and landscape patterns on the spread of exotic species[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3): 569-579. (in Chinese))
- [60] 刘会玉, 林振山, 齐相贞, 等. 基于个体的空间显性模型和遥感技术模拟入侵植物扩张机制[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7794-7802. (LIU Huiyu, LIN Zhenshan, QI Xiangzhen, et al. The dispersal mechanism of invasive plants based on a spatially explicit individual-based model and Remote sensing technology: a case study of *Spartina alterniflora*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): 7794-7802. (in Chinese))
- [61] 易雨君, 谢泓毅, 宋劫, 等. 黄河口盐沼湿地植被群落适宜生境模拟 I: 理论[J]. 水利学报, 2021, 52(3): 255-264. (YI Yujun, XIE Hongyi, SONG Jie, et al. Simulation of salt marsh vegetation community's suitable habitat in Yellow River Estuary I: theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(3): 255-264. (in Chinese))
- [62] 易雨君, 谢泓毅, 宋劫, 等. 黄河口盐沼湿地植被群落适宜生境模拟 II: 应用[J]. 水利学报, 2021, 52(4): 401-408. (YI Yujun, XIE Hongyi, SONG Jie, et al. Simulation of salt marsh vegetation community's suitable habitat in Yellow River Estuary II: application[J]. 2021, 52(4): 401-408. (in Chinese))
- [63] LOTKA A J. Elements of Physical Biology[M]. Williams & Wilkins, 1925.
- [64] VOLTERRA V. Variazioni E Fluttuazioni Del Numero D'individui in Specie Animali Conviventi[M]. Società anonima tipografica "Leonardo da Vinci", 1927.

- [65] TILMAN D. Resources: a graphical-mechanistic approach to competition and predation[J]. *the American Naturalist*, 1980, 116(3): 362-393.
- [66] KEAMMERER H B, HACKER S D. Negative and neutral marsh plant interactions dominate in early life stages and across physical gradients in an Oregon estuary[J]. *Plant Ecology*, 2013, 214: 303-315.
- [67] YUAN Y, WANG K, LI D, et al. Interspecific interactions between *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* along a tidal gradient in the Dongtan Wetland, Eastern China[J]. *PloS One*, 2013, 8(1): e53843.
- [68] GRIME J P. The CSR Model of Primary Plant Strategies—origins, Implications and Tests[M]. *Plant evolutionary biology*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1988: 371-393.
- [69] 田灿荣. 一类带时滞竞争模型的周期解[J]. *生物数学学报*, 2007, 22(3): 431-440. (TIAN Canrong. Periodic solutions of a delay competitive model[J]. *Journal of Biomathematics*, 2007, 22(3): 431-440. (in Chinese))
- [70] 周桦, 刘佳. 带扩散的具有 Holling III 类功能性反应的捕食模型的性质[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2007, 29(5): 66-69. (ZHOU Hua, LIU Jia. Analysis on Holling type III predator-prey with diffusion model quality[J]. *Journal of Nanjing University of Technology*, 2007, 29(5): 66-69. (in Chinese))
- [71] 程惠东, 孟新柱, 王芳. 一类时滞非自治 Lotka-Volterra 扩散生态系统的全局吸引力[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2008, 47(2): 18-22. (CHENG Huidong, MENG Xinzhu, WANG Fang. Global dynamics behaviors for a nonautonomous Lotka-Volterra almost periodic dispersal system with delays[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2008, 47(2): 18-22. (in Chinese))
- [72] 陈兰荪, 王东达, 杨启昌. 阶段结构种群动力学模型[J]. *北华大学学报(自然科学版)*, 2000, 1(3): 185-191. (CHEN Lansun, WANG Dongda, YANG Qichang. The models of stage-structured population dynamics[J]. *Journal of Beihua University(Natural Science)*, 2000, 1(3): 185-191. (in Chinese))
- [73] HE X, NI W M. Global dynamics of the Lotka-Volterra competition-diffusion system: diffusion and spatial heterogeneity I[J]. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 2016, 69(5): 981-1014.
- [74] HE X, NI W M. Global dynamics of the Lotka-Volterra competition-diffusion system with equal amount of total resources, II[J]. *Calculus of Variations and Partial Differential Equations*, 2016, 55(2): 25.
- [75] HE X, NI W M. Global dynamics of the Lotka-Volterra competition-diffusion system with equal amount of total resources, III[J]. *Calculus of Variations and Partial Differential Equations*, 2017, 56(5): 132.
- [76] 李自珍, 惠苍, 徐中民. 集合种群模拟模型及其在竞争共存机制与物种多样性研究中的应用[J]. *西北植物学报*, 2003, 23(2): 195-199. (LI Zizhen, HUI Cang, XU Zhongmin. Simulation model of metapopulations and its application to competing coexistence and species richness[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23(2): 195-199. (in Chinese))
- [77] TILMAN D. *Plant Strategies and the Dynamics and Structure of Plant Communities*. (MPB-26), Volume 26[M]. Princeton University Press, 2020.
- [78] ETIENNE R S. Local populations of different sizes, mechanistic rescue effect and patch preference in the Levins metapopulation model[J]. *Bulletin of Mathematical Biology*, 2000, 62: 943-958.
- [79] HANSKI I, GYLLENBERG M. Two general metapopulation models and the core-satellite species hypothesis[J]. *the American Naturalist*, 1993, 142(1): 17-41.
- [80] NEE S, MAY R M. Dynamics of metapopulations: habitat destruction and competitive coexistence[J]. *Journal of Animal Ecology*, 1992: 37-40.
- [81] BASCOMPTE J, SOLÉ R V. Effects of habitat destruction in a prey-predator metapopulation model[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1998, 195(3): 383-393.
- [82] 张锋, 李自珍, 惠苍. 中国湿地物种多样性与生境面积关系及其生态学机理的模拟研究[J]. *西北植物学报*, 2004, 24(3): 392-396. (ZHANG Feng, LI Zizhen, HUI Cang. Species-area relationship of Chinese wetlands and its theoretical simulation[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, 24(3): 392-396. (in Chinese))
- [83] 陈洁, 周年兴, 李灿, 等. 集合种群竞争机制在庐山森林演替模拟中的应用[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(3): 862-868. (CHEN Jie, ZHOU Nianxing, LI Can, et al. Application of meta-population competition mechanism in forest succession simulation of Mount Lushan[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(3): 862-868.

(in Chinese))

- [84] 徐娴雅. 基于集合种群理论生态模型的垂直森林社区设计模式探究[J]. 西部林业科学, 2021, 50(4): 139-144. (XU Xianya. Vertical forest community plan design based on metapopulation model[J]. Journal of West China Forestry Science, 2021, 50(4): 139-144. (in Chinese))
- [85] QI M, FENG M, SUN T, et al. Resilience changes in watershed systems: A new perspective to quantify long-term hydrological shifts under perturbations[J]. Journal of Hydrology, 2016, 539: 281-289.
- [86] QI M, SUN T, XUE S F, et al. Competitive ability, stress tolerance and plant interactions along stress gradients [J]. Ecology, 2018, 99(4): 848-857.
- [87] 刘华, 金鑫, 谢梅, 等. 外来植物物种入侵机理及其空间分布模拟[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2016, 52(3): 375-379. (LIU Hua, JIN Xin, XIE Mei, et al. Invasion mechanism and space distribution simulation of exotic plant species[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2016, 52(3): 375-379. (in Chinese))
- [88] 孙靖尧, 李新荣. 基于元胞自动机的植被规则格局的形成模拟[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, 56(2): 219-223. (SUN Jingyao, LI Xinrong. A cellular automata model for regular pattern formation in vegetation [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2020, 56(2): 219-223. (in Chinese))
- [89] 黄荣敏, 黄钰铃, 曾月, 等. 长江大保护试点城市某污水处理厂尾水湿地净化效果研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, 22(2): 169-178, 194. (HUANG Rongmin, HUANG Yuling, ZENG Yue, et al. Decontamination effect of tail water wetland accompanying the sewage treatment plant-A case in the area of the Yangtze River Grand Protection[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024, 22(2): 169-178, 194. (in Chinese))
- [90] 王伟杰, 赵进勇, 冯达骞, 等. 基于植被粗糙度的生态渠道阻力系数研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2023, 21(6): 519-525. (WANG Weijie, ZHAO Jinyong, FENG Daqian, et al. Study on resistance coefficient of ecological channel based on vegetation roughness[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2023, 21(6): 519-525. (in Chinese))
- [91] 杨宇, 曾利, 吴一红, 等. 微囊藻水华暴发的水动力机理与模拟研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2022, 20(5): 449-463. (YANG Yu, ZENG Li, WU Yihong, et al. Research progress on hydrodynamic mechanisms and simulation of Microcystis blooms[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(5): 449-463. (in Chinese))
- [92] 刘晓波, 韩祯, 王世岩, 等. 长江大保护视角下鄱阳湖湿地保护的研究思考[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(2): 201-209. (LIU Xiaobo, HAN Zhen, WANG Shiyan, et al. A research thinking of Poyang Lake wetland from the perspective of Yangtze River protection[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(2): 201-209. (in Chinese))
- [93] 胡振鹏, 林玉茹. 鄱阳湖水生植被 30 年演变及其驱动因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(8): 1947-1955. (HU Zhenpeng, LIN Yuru. Analysis of evolution process and driving factors for aquatic vegetations of Poyang Lake in 30 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(8): 1947-1955. (in Chinese))
- [94] 蒯亚玲, 李相虎, 谭志强, 等. 基于遥感时空融合的鄱阳湖洪泛湿地植物群落动态变化特征[J]. 湖泊科学, 2023, 35(4): 1408-1423. (LIU Yaling, LI Xianghu, TAN Zhiqiang, et al. Dynamic characteristics of vegetation communities in the floodplain wetland of Lake Poyang based on spatio-temporal fusion of remote sensing data[J]. Journal of Lake Science, 2023, 35(4): 1408-1422. (in Chinese))

Research progress of numerical simulation of wetland plant ecology and research example of Poyang Lake wetland

HAN Zhen^{1,2,3}, SUN Long^{1,2,3}, WANG Shiyan^{1,2,3}, WANG Jie^{1,2,3}, LIU Xiaobo^{1,2,3}, PENG Wenqi^{1,2,3}

(1. Department of Water Ecology and Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Key Laboratory of Water Safety in Beijing Tianjin Hebei, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China;

3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of River Basin Water Cycle, Beijing 100038, China)

Abstract: The structure and spatial distribution pattern of wetland plant communities play a decisive role in the structure and function of wetland ecosystems. Traditional field monitoring and controlled experiments have limitations in studying the large-scale structure and spatial distribution of wetland plant communities, and there are deficiencies in establishing the organic link between “ecological process-spatial pattern” and predicting dynamic changes. Therefore, mathematical models have become an important tool for studying the expansion, spatial distribution and interrelationships of wetland plant populations. By reviewing the relevant research literature at home and abroad and according to the degree of model description of ecological mechanisms and spatial patterns, wetland plant simulation can be divided into three types: statistical models, species distribution models and population dynamics models. Although the current wetland plant models have made some progress in the theoretical and methodological aspects, the spatiotemporal matching problem between the environmental condition module and the plant module, and the mechanism integration problem of the life history process of wetland plants significantly restrict the rationality and accuracy of the models. Finally, taking the Poyang Lake, a large-scale lake wetland connected to a river as an example, a wetland plant simulation framework driven by hydrodynamics was constructed, and the development direction of wetland plant simulation was proposed from two aspects of mechanism and application. On the mechanism level, the ecological mechanism support should be strengthened based on the unique hydrological process of the river-connected lake. On the application level, the focus should be on the hydrological situation under the change of the river-lake relationship, coupling the population dynamics method on the basis of the hydrodynamic model, depicting the vegetation succession dynamics and spatial pattern, and carrying out comparison verification by field investigation and remote sensing impact comparison, to improve the model accuracy.

Keywords: wetland; plant simulation; spatial distribution; population dynamics; advance

(责任编辑:王学风)

《中国水利水电科学研究院学报(中英文)》 2023 年度优秀论文公告

为不断提高论文质量和学术影响力,鼓励为《中国水利水电科学研究院学报(中英文)》撰写高水平学术论文的作者,根据《〈中国水利水电科学研究院学报(中英文)〉优秀论文和优秀审稿人评选办法》(水科事业〔2023〕35号)规定,经编委投票、编委会主任审定,“基于水资源价值流的跨多区域横向生态补偿标准研究”等6篇论文被评选为2023年度优秀论文。

《中国水利水电科学研究院学报(中英文)》2023 年度优秀论文

序号	题名	第一作者	第一作者单位	年期
1	基于水资源价值流的跨多区域横向生态补偿标准研究	高慧忠	中国水利水电科学研究院	2023.3
2	长江流域典型城市暴雨雨型特征分析	徐俊杰	中国水利水电科学研究院	2023.1
3	长江流域水系统生态服务价值评价方法	郑阳	中国水利水电科学研究院	2023.3
4	设定地震场地相关设计反应谱的研究	陈厚群	中国水利水电科学研究院	2023.4
5	长江源区年际冰水情变化及其影响因子分析	潘佳佳	中国水利水电科学研究院	2023.1
6	溃坝洪水演进及溃坝水流对下游坝体冲击研究	周昔东	重庆交通大学	2023.1

《中国水利水电科学研究院学报(中英文)》编辑部