

水深环境梯度下柽柳种群分布格局的分形分析

贺强, 崔保山, 胡乔木, 杨舒茜, 赵欣胜

(北京师范大学 环境学院 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875)

摘要: 利用计盒维数和信息维数两种分形方法分析了黄河三角洲湿地柽柳种群的空间分布特征及其随水深梯度的变化。结果表明, 不同水深梯度下柽柳种群分布格局的计盒维数均较大, 随着水深的增大而逐渐减小, 但变化幅度较小, 反映了不同水深梯度下柽柳种群对水平空间的占据程度较大; 信息维数总体上随水深的增大而减小, 在水深低于 -1.55 m 范围内, 信息维数较大, 柽柳种群的微观结构较为复杂, 格局强度较高, 水深高于 -1.55 m 时, 信息维数较小, 柽柳种群的微观结构较为简单, 格局强度较弱。水深 -1.55 m 可能是黄河三角洲湿地柽柳种群分布格局的一个阈值。

关键词: 柽柳; 分布格局; 计盒维数; 信息维数; 湿地; 黄河三角洲

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)05-0070-04

中图分类号: Q145

Fractal Analysis on the Distribution Patterns of *Tamarix Chinensis* Under Environmental Gradients of Different Water Table Depth

HE Qiang, CUI Bao-shan, HU Qiao-mu, YANG Shu-qian, ZHAO Xin-sheng

(State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control,
School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The distribution patterns of *Tamarix chinensis* population under the environmental gradient of different water table depth were analyzed using two fractal analysis methods—box dimension and information dimension. The box dimension changed little with different water table depths and kept a high dimension, which means that *Tamarix chinensis* population may keep a high spatial possessive degree for different water table depth. However, the information dimension in general decreased with the decline of water table depth. When water table depth was below -1.55 m, the information dimension was large, indicating that in this section of water table depth gradient, the micro-structure of *Tamarix chinensis* population was much complex and the pattern intensity was high. When water table depth was above -1.55 m, the information dimension was generally very small, indicating that the micro-structure of *Tamarix chinensis* population was very simple and the pattern intensity was low. The water table depth of -1.55 m may be a threshold of the distribution patterns of *Tamarix chinensis* in wetlands of the Yellow River Delta.

Keywords: *Tamarix chinensis*; distribution pattern; box dimension; information dimension; wetlands; Yellow River Delta

湿地生态系统中植物分布与水分因子息息相关, 水分的盈缺丰亏、时空格局等对湿地植物的分布起关键作用^[1]。近年来, 人类对于淡水资源的大规模调控, 包括淡水分流, 河流改道, 调水调沙等, 使自然湿地生态系统面临着巨大的挑战^[2-3]。研究湿地植物分布与水分因子之间的生态关系是服务于湿地生态系统调控的需求, 对于合理利用湿地生物多样性, 保

证湿地生态系统健康, 实现区域可持续发展起重要作用^[1-3]。空间格局分析是研究植物种群特征, 种群间相互作用以及种群与环境关系的重要手段, 一直是生态学研究热点之一^[4-6]。种群空间分布格局及其动态往往反映出环境对种群内个体生存和生长的影响, 也能反映植物的生态适应对策。因此, 一旦格局被表述出来, 就能进一步探求产生和维持这些格局的

收稿日期: 2007-06-22

修回日期: 2008-06-26

资助项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2006CB403303); 国家自然科学基金项目(40571149)

作者简介: 贺强(1985—), 男(汉族), 河北省邢台市人, 博士生, 主要从事湿地生态与植物生态研究。E-mail: heqiangbnu@163.com。

通信作者: 崔保山(1967—), 男(汉族), 河北省张家口市人, 教授, 博士生导师, 主要从事湿地生态研究。E-mail: cuib@s@163.com。

内部机制^[5, 7]。虽然目前已有许多文献研究了植物种群的空间格局^[4-6], 却少有文献以定量方法进一步探求决定植物种群空间分布格局的内部机制。

本文以黄河三角洲湿地柽柳种群为研究对象, 利用格局分析方法, 定量分析了黄河三角洲不同水深下柽柳分布格局的计盒维数和信息维数, 揭示了不同水深下柽柳种群的空间分布特征, 旨在阐明湿地植物分布与水分因子的生态关系, 为湿地生态系统, 尤其是淡水资源的调控提供科学依据。

1 研究区概况

黄河三角洲国家级自然保护区(37°40′—38°10′N, 118°41′—119°16′E)地处我国山东省东营市黄河入海口, 总面积 $1.53 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 是以保护黄河口新生湿地生态系统和珍稀濒危鸟类为主体的自然保护区。属暖温带季风性气候区, 具有明显的大陆性季风气候特点。四季分明, 冷热干湿界限极明显。年平均气温 12.1 °C, 无霜期 196 d, 年降水量 551.6 mm, 年蒸发量 1 962 mm。主要植被类型为沼生芦苇(*Phragmites australis*)群落、沼生芦苇——荻(*Triarrhena sacchariflora*)群落、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)群落、柽柳(*Tamarix chinensis*)群落、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)群落及补血草(*Limonium spp.*)群落等, 其中沼生芦苇群落、柽柳群落及盐地碱蓬群落分布较广。

2 研究方法

2.1 野外调查

研究区植物群落特征和柽柳种群特征在水深梯度上存在明显的变化^[8-9]。在水深较低, 常年无淹水的地区, 以柽柳、补血草、碱蓬(*Suaeda glauca*)等为优势种, 柽柳盖度较高, 可高达 50%~60%; 随着水深的提高, 逐渐演变为以芦苇和盐地碱蓬为优势种的植物群落, 柽柳盖度较低, 约为 10%~30%; 在常年积水较深的地区, 群落以芦苇、穗状狐尾藻、香蒲(*Typha orientalis*)等为优势种, 柽柳盖度低于 5%。长期淹水是导致幼龄柽柳死亡的主要原因, 本文选择 4~5 a 龄级柽柳作为监测对象。

野外调查于 2005 年 8 月份进行。调查地点在山东省黄河三角洲自然保护区大汶流管理站东南处(37°45′37.9″N, 119°03′28.9″E)开展。共设 60 m × 60 m 研究样地 8 个, 在样地中记录柽柳种群的每个个体的位置, 以坐标值表示, 坐标值用距离(m)直接表示。用标尺测定水深, 取平均后作为该样地的水深, 用于下文数据分析。

2.2 数据分析

2.2.1 计盒维数及其生态意义 计盒维数的计算是将样方逐次栅格化, 依次得到一系列不同网格边长 ε 的网格覆盖(本文中网格边长分别是 30, 20, 15, 12, 10, 7.5, 6, 5, 4, 3, 2, 1.5 和 1.2 m)。计数每一网格边长时有坐标点的非空格子数 $N(\varepsilon)$ 。将每次栅格化所得的 $N(\varepsilon)$ 与对应的网格边长 ε 在双对数坐标下进行直线拟合或分段直线拟合, 所得直线斜率的绝对值即为计盒维数^[10], 可以用式(1)表示。

$$D_b = - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} \quad (1)$$

计盒维数反映了分形体对空间的占据程度。在双对数坐标下, $N(\varepsilon)$ 与 ε 的关系曲线往往存在一个拐点, 拐点所对应的尺度即为种群个体聚块的大小。当尺度小于拐点尺度时, 计盒维数介于 0 和 1 之间, 其所反映的是位点对水平空间的占据; 当尺度大于拐点尺度时, 计盒维数介于 1 和 2 之间, 其所反映的是种群完整个体对水平空间的占据。本文所进行的种群格局研究所要了解的是种群的空间分布特征, 而大于拐点尺度的计盒维数真正反映了种群对于空间的占据特征, 因此对于存在拐点的 $N(\varepsilon)$ 与 ε 双对数坐标下的关系曲线, 应选择大于拐点尺度时的计盒维数进行相应分析^[10-12]。

2.2.2 信息维数及其生态意义 信息维数的计算同样是将样方逐次栅格化, 依次得到一系列不同网格边长 ε 的网格覆盖(本文中的网格边长同上)。但它须计数每一非空格子中拥有的个体数 N_i , 若该样方内的总个体数目为 N , 则概率 $P_i = N_i/N$ 。每一网格边长时每个格子的信息量 $I_i = -P_i \ln P_i$, 则该网格边长时的总信息量 $I(\varepsilon) = \sum I_i$ 。将每次栅格化所得的信息量 $I(\varepsilon)$ 与对应边长的对数值 $\ln \varepsilon$ 进行直线拟合或分段直线拟合。所得直线斜率的绝对值即为信息维数^[10]。可以用式(2)表示。

$$D_i = - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{I(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} \quad (2)$$

信息维数是计盒维数的推广。计盒维数只考虑了每个格子中是否有个体存在, 但对每个非空格子中的个体数目并未区分。计盒维数将这一点考虑在内, 赋予每个格子一个概率密度, 进而通过信息量公式 $I_i = -P_i \ln P_i$ 给出了每一尺度与对应信息量的幂律关系。而信息是一个系统结构复杂程度的度量, 这样实际上信息维数反映了系统的结构复杂程度。大的信息维数较小的信息维数所对应的系统的微观结构更为复杂。而系统微观结构的复杂性是系统组分分布的非均匀性。这样, 种群的信息维数就正好反映了种

群分布的格局强度^[12]。在计算信息维数时, $I(\epsilon)$ 与对应边长的对数值的关系曲线也往往存在一个拐点。我们通过以下两点进行判断: 首先, 作为一个分形体空间维数, 它应小于它所在空间的拓扑维数。

本文所研究的是植物种群分布的水平空间格局, 所以信息维数应小于 2; 此外, 信息维数反映的是系统微观结构的非均匀性, 那么所对应的尺度也应该是小的。因此应选择小于拐点尺度的信息维数进行相关分析。这一信息维数介于 0 和 2 之间, 该值越大, 它所对应的种群的微观结构就越复杂, 其格局强度也就越大^[12-13]。

表 1 不同水深下柽柳种群格局的计盒维数和信息维数

样地	平均水深/m	计盒维数	相关系数	显著水平	信息维数	相关系数	显著水平
1	- 3.00	1.95	0.998 4	$P < 0.001$	0.89	0.944 1	$P < 0.001$
2	- 2.20	1.97	0.999 6	$P < 0.001$	1.20	0.904 5	$P < 0.001$
3	- 1.55	1.97	0.999 8	$P < 0.001$	0.94	0.939 1	$P < 0.001$
4	- 1.20	1.98	0.999 8	$P < 0.001$	0.37	0.654 4	$P < 0.050$
5	- 0.80	1.81	0.994 3	$P < 0.001$	0.48	0.841 5	$P < 0.010$
6	- 0.30	1.78	0.987 0	$P < 0.001$	0.52	0.649 7	$P < 0.050$
7	0.25	1.65	0.979 7	$P < 0.001$	0.36	0.799 5	$P < 0.010$
8	0.70	1.62	0.978 2	$P < 0.001$	0.52	0.844 0	$P < 0.001$

表 2 计盒维数、信息维数与种群个体数线性回归

项目	灵敏度	相关系数	显著水平
计盒维数	0.002	0.600	0.024
信息维数	0.005	0.693	0.010

3.2 不同水深下柽柳种群格局的信息维数

不同水深的各样地的信息维数如表 1 所示。从表 1 可以看出, 各样地信息维数的计算结果线性关系也达到了显著或十分显著的程度。总的来看, 柽柳种群分布格局的信息维数随着水深的增大而明显减小, 但存在波动。各样地信息维数的最大值为 1.20, 最小值为 0.36, 最大值是最小值的 3.3 倍, 表明柽柳种群分布格局的微观结构复杂性变化较大, 格局强度差异显著。

3.3 柽柳种群分布格局与水深梯度的关系

从不同样地柽柳种群的计盒维数来看, 黄河三角洲柽柳种群在不同的水深下对空间均有较大的占据程度, 随水深的增大其占据能力略有减小; 但不同水深下柽柳种群分布格局的计盒维数差异很小。

从不同样地柽柳种群的信息维数来看, 当水深低于 - 1.55 m 时, 柽柳种群分布格局的信息维数明显增大, 种群的内部结构复杂性增大, 柽柳种群聚集程度明显增强, 这对于柽柳种群抵抗外界不利环境条件而增大生存和繁衍机会都是有利的^[14]。黄河三角洲

3 结果与分析

3.1 不同水深下柽柳种群格局的计盒维数

从各样地的计盒维数(表 1)可以看出, 各样地计盒维数的计算结果线性关系均非常显著。柽柳种群分布格局的计盒维数虽然随着样地平均水深的增大而减小, 但变化幅度较小, 最小值为 1.62, 最大值为 1.98, 平均值为 1.84, 表明柽柳对空间的占据程度较为稳定。由于计盒维数均非常接近水平空间的拓扑维数 2, 表明柽柳种群对空间的占据程度相当高, 且随水深的增大其对空间的占据程度略有减小。

水深低于 - 1.55 m 的区域一般位于黄河两岸的河滩高地或远离河口的内陆地区, 土壤盐分含量较低, 有利于柽柳的生存和繁衍。而水深高于 - 1.55 m 时, 其聚集程度则明显减小。在水深 - 1.55 ~ - 0.30 m 范围内, 土壤盐渍化现象一般较严重^[1], 过高的土壤盐分含量限制了柽柳的生长和繁衍。水深高于 - 0.30 m 的区域, 一般为黄河三角洲淡水或微咸水湿地, 一般以湿生和水生植物种群为主, 湿生与水生植物对环境资源的竞争以及过高水深对柽柳幼苗的发育和柽柳呼吸作用的限制, 可能使柽柳在此水深范围内难以生存繁衍。

4 讨论

4.1 计盒维数与信息维数的比较分析

从柽柳种群分布格局的计盒维数、信息维数与种群个体数线性回归分析(表 2)中, 可以看出, 计盒维数对种群个体数变化的灵敏度仅为 0.002, 而信息维数对种群个体数变化的灵敏度为 0.005, 是计盒维数的 2.5 倍。信息维数对样方内个体数量的变化较计盒维数更为敏感^[12]。表 3 总结了计盒维数与信息维数的差异。在计算方法上, 计盒维数只计数了有个体存在的非空格子数, 而信息维数则进一步计数了非空格子中的个体数。

从计算结果来看,黄河三角洲柽柳种群分布格局的计盒维数一般要远大于其信息维数,一般是信息维数的 2~ 5 倍。计盒维数的变化幅度较小,8 个样地的最大值仅为最小值的 1.2 倍;而信息维数的变化幅度较大,8 个样地的最大值达到最小值的 3.3 倍。

从生态意义上来看,计盒维数反映的是种群对于空间的占据能力,这种能力反映了种群对于生存空间的竞争能力。黄河三角洲柽柳种群在不同水深时对

空间的占据程度均较高,反映了不同水深时柽柳对生存空间的竞争能力均较高,随着水深的增大其竞争能力略有减小。而信息维数主要考虑种群个体的分布概率问题,它是种群微观结构的复杂程度的表征,反映了种群分布格局聚集程度的大小。黄河三角洲湿地不同水深下柽柳种群分布格局的聚集程度差异十分显著,水深低于- 1.55 m 时,其聚集程度明显增大,水深高于- 1.55 m 时,其聚集程度则明显减小。

表 3 计盒维数与信息维数的比较

比较项目	计盒维数	信息维数
计算方法	$D_b = - \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N\epsilon}{\ln \epsilon}$	$D_i = - \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{I(\epsilon)}{\ln \epsilon}$
生态意义	反映种群对于生存空间的占据能力及竞争能力	反映种群的微观结构的复杂程度,种群分布格局聚集程度的大小
对样方内个体数量的敏感程度	不敏感	非常敏感
分形维的数值大小	较大且较稳定	较小但变幅较大

4.2 利用分形分析讨论湿地植物种群分布格局及与水深梯度关系的优势

分形分析方法是建立在生态参量与尺度的分形关系以及生态分形体的自相似性的原理基础之上的,因此不受尺度的限制^[12, 15]。在研究湿地植物的种群分布格局时,可以设定尺度不同的样地,很大程度上方便了湿地科研工作地开展。

5 结论

(1) 黄河三角洲湿地不同水深梯度下柽柳种群分布格局的计盒维数均较大,反映了不同水深梯度下柽柳对水平空间的占据程度较大;计盒维数随着水深的增大而逐渐减小,但变化幅度较小。

(2) 黄河三角洲湿地柽柳种群分布格局的信息维数总体上随水深的增大而减小。水深低于- 1.55 m 时,信息维数较大,柽柳种群在此水深范围内分布格局的微观结构较为复杂,格局强度较高;水深高于- 1.55 m 时,信息维数较小,柽柳种群在此水深范围内分布格局的微观结构较为简单,格局强度较低。

(3) 水深- 1.55 m 可能是黄河三角洲湿地柽柳种群分布格局的一个阈值。

[参 考 文 献]

[1] 谭学界,赵欣胜. 水深梯度下湿地植被空间分布与生态适应[J]. 生态学杂志, 2006, 25(12): 1460-1464.
 [2] 杨志峰,崔保山,刘静玲,等. 生态环境需水量理论与方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1-5.
 [3] 崔保山,杨志峰. 湿地学[M]. 北京: 北京师范大学出版

社, 2006: 4-8.

[4] Greig Smith P. Quantitative Plant Ecology [M]. London: Blackwell Scientific Publications, 1983: 20-50.
 [5] 刘振国,李镇清. 不同放牧强度下冷蒿种群小尺度空间格局[J]. 生态学报, 2004, 24(2): 227-235.
 [6] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 169-174.
 [7] Dieckmann U, Herben T, Law R. Spatio-temporal processes in plant communities [C] // Lepenies W. Yearbook 1995/1996, Institute for Advanced Study Berlin. Berlin: Nicolaische Verlagsbuchhandlung, 1997: 296-326.
 [8] 贺强,崔保山,赵欣胜,等. 水盐梯度下黄河三角洲湿地植被空间分异规律的定量分析[J]. 湿地科学, 2007, 5(3): 208-214.
 [9] 崔保山,贺强,赵欣胜. 水盐环境梯度下翅碱蓬(*Suaeda salsa*)生态阈值研究[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1408-1418.
 [10] 张文辉,祖元刚,马克明. 裂叶沙参与泡沙参种群分布格局分形特征的分析[J]. 植物生态学报, 1999, 23(1): 31-39.
 [11] 马克明,祖元刚. 兴安落叶松种群格局的分形特征: 计盒维数[J]. 植物研究, 2000, 20(1): 104-111.
 [12] 祖元刚,赵则海,于景华,等. 非线性生态模型[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 222-225.
 [13] 马克明,祖元刚. 兴安落叶松种群格局的分形特征: 信息维数[J]. 生态学报, 2000, 20(2): 187-192.
 [14] 林鹏. 植物群落学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986.
 [15] 马克明,祖元刚. 植被格局的分形特征[J]. 植物生态学报, 2000, 24(1): 111-117.