

DOI: 10.3724/SP.J.1035.2010.00115

南京玄武湖菹草石芽空间变异及其原因探讨

杨文斌^{1,2} 王国祥² 王 刚^{1,3}

(1. 安徽师范大学环境科学与工程学院, 芜湖 241003; 2. 南京师范大学地理科学学院, 江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 南京 210046; 3. 盐城师范学院城市与资源环境学院, 盐城 224002)

摘要: 为了解玄武湖菹草石芽的空间分布状况, 用网格法布设 52 个石芽采样点, 采样点以 GPS 定位, 在每个点采集表层底泥 15 cm 深度以上石芽, 每个点采集 4 个样, 然后求和代表该点石芽密度。运用 ArcGIS 的 geostatistics 组件分析了玄武湖菹草石芽数量的空间变异特征及其形成原因。结果表明: ① 石芽数量的半方差函数可拟合为球状模型, 石芽在空间呈聚集分布; ② 石芽在各湖中具有非常明显的空间异质性, 东北湖石芽密度最大(均值 30.5 颗/m²), 西南湖密度最小(均值 10 颗/m²); 从石芽密度的分维数来看石芽密度的空间异质性, 全方向<椭圆半长轴方向<椭圆半短轴方向上; ③ 割草干扰、种群数量、水深、水流、立地条件的空间异质性造成石芽密度的空间异质性; ④ 石芽数量的空间自相关尺度, 远远大于菹草石芽能够自行散落的距离, 说明流水的带动起了很重要的扩散作用。

关键词: 石芽数量; 空间变异; 地统计学

中图分类号: Q948.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2010)01-0115-06

菹草(*Potamogeton crispus*)是眼子菜科多年生草本沉水植物, 秋季萌发、幼苗越冬、春季生长迅速、夏初死亡。石芽是菹草种子库的主要构成成分, 菹草繁殖高度依赖石芽(变态茎)克隆, 在自然状况下菹草石芽密度可达 238—1648 颗/m², 石芽萌发率达到 60%—80%^[1-4]。尽管菹草可以作为冬季至初夏净化水质的重要沉水植物, 但过量生长的菹草阻塞河道、影响城市湖泊的水上游览功能、其衰亡还会造成“黄水”现象危害渔业发展、残体腐败分解造成水质二次污染^[5,6], 必须适度收割、打捞。

2006—2007 年, 南京玄武湖出现菹草暴发式生长, 菹草暴发时, 玄武湖东南湖区盖度最大时达 70%—80%, 其他湖区盖度也达到 20%—30%, 最大生物量达到 4 kg/m²; 2008 年春季玄武湖菹草基本消失, 最大生物量只有 27.6 g/m²。玄武湖高强度割草、菹草分布的空间差异、水流等因素对玄武湖石芽数量和分布产生怎样的影响, 对这些问题的研究, 可

为菹草植被恢复中种子库所发挥的实际作用及幼苗生长的影响因素的研究提供基础数据, 也可以为玄武湖及同类湖泊生态修复、环境管理提供指导。

以往对种子库进行研究, 假定所研究的变量为纯随机变量, 然后运用经典统计学进行研究的方法。该方法忽视了样本在空间分布上具有的相关性和方向性, 并受到抽样方法和抽样大小范围的限制^[7]。

由于刈割、水深、基质、水流等因素的影响, 导致了石芽数量的空间分布不均, 即具有空间变异性。这种空间变异性具有结构性(空间相关性)和随机性双重特征, 可以将相互间具有一定相关性的石芽数量看作是“区域化变量”。与经典统计学方法不同, 地统计学考虑样点的方向、位置和彼此间的距离, 直接测定和分析空间依赖性, 用于研究有一定随机性和有一定结构性的各种变量的空间分布规律^[8,9]。因此, 可以应用地统计学原理与方法研究石芽数量的空间变异问题。国内应用地统计学研究生

收稿日期: 2008-08-04, 修订日期: 2009-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(40873057); 安徽师范大学博士科研启动基金资助

作者简介: 杨文斌(1968—), 男, 汉族, 安徽长丰人; 副教授, 博士; 主要从事水环境修复、环境评价研究。E-mail: ywb2002702@yahoo.com.cn

通讯作者: 王国祥, E-mail: wangguoxiang@njnu.edu.cn

态学问题主要是研究种群分布格局,如王晓春等分析了长白山岳桦的种群格局^[10],潘文斌等用地统计学方法分析了水生植物群落的格局^[11],使用地统计学方法研究种子库的空间格局和变异未见报道。

1 数据的采集和研究方法

1.1 石芽数据的采集

采样时间:2007年11月底。采样点位的选择:将玄武湖轮廓按照经纬度差异10等分网格化后,根据以下依据在网格交会点选择52个采样点(图1):1)2007年春天不同密度菹草分布区域、水深不同区域、基质不同区域;2)所选点位、数量满足统计学要求(样本值都是随机过程的结果;样本数尽量大,样本对数不少于10对;样本值要符合正态分布,不符合的应将数据转换符合正态分布)。

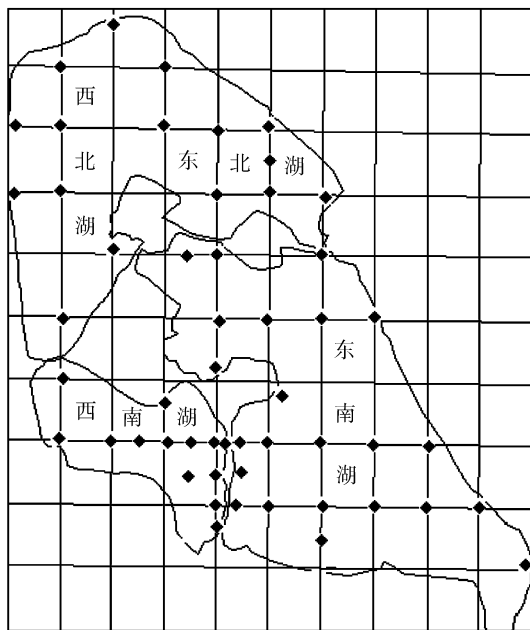


图1 玄武湖菹草石芽采样点位图
Fig. 1 Sampling points of *P. crispus* turion

采样方法:以GPS定位,用自制采泥器(0.25 m²)采集深度15 cm以上表层底泥石芽,每个点采集4个样求和代表该点石芽密度。

1.2 菹草密度的调查

2007年4月13日至4月15日,用GPS定位,确定不同密度菹草的分布范围;用自制采样夹采集菹草,统计其密度和生物量,用Mapinfor绘制菹草密度分布差异图。

1.3 研究方法

半方差函数(Semivariogram)是地统计分析所特有的工具。通过测定区域化变量分隔等距离的样点间的差异来研究变量的空间相关性和空间结构。分隔距离 h 的两点 x 和 $x+h$ 的区域化变量 $z(x)$ 和 $z(x+h)$ 之间的变异,可以用它们的增量 $[z(x)-z(x+h)]$ 平方的数学期望(即区域化变量增量的方差)来表示:

$$2\gamma(h) = E\{[z(x) - z(x+h)]^2\} = \text{var}\{z(x) - z(x+h)\}$$

式中, $\gamma(h)$ 称为半方差函数。

计算取样范围内所有可能距离间隔的半方差函数后,就可绘制出半方差函数曲线图,进而建立半方差函数的理论模型,并通过块金值(Nugget)、基台值(Sill)、变程(Range)、分维数(Fractal dimension)、空间变异比等模型参数定量地分析区域化变量的空间变化规律。绘出 $\gamma(h)$ 和 h 的双对数图,根据图上的直线斜率就可求出空间关系的表征,即分形维数,公式如下: $D = (4 - m) / 2$ 式中, D 为分维数, m 为双对数半方差曲线图的斜率。 D 值越小于2, m 值越大,双对数半方差图中的直线越陡,表明出现不同尺度间隔样方间的差异性越显著,研究对象的空间异质性越强^[12,13]。

Kriging插值是一种估计观测样点间内插值的地学统计学方法。它基于区域化变量理论,当获得了变量的半变异函数的模拟模型后,就可以利用样点观测值对研究区域上未取样点的区域化变量值进行估计^[14]。应用Arcmap组件Geostatistics进行玄武湖菹草石芽数据的基本统计、变异函数建模和Kriging插值计算,完成对玄武湖石芽的空间分布规律分析。

2 结 果

2.1 石芽密度的空间结构分析

对调查数据进行对数转换(以10为底),转换后的数据接近于正态分布,可以用于半方差函数的分析。自然界中环境因子、种群分布等大多表现为非均匀性,因此石芽密度的半方差函数选择各向异性模型较为合适,本文同时对假设为各向同性模型及有关参数进行了对比研究。表1中,变程 A_0 代表了石芽数量的空间自相关变化尺度,各向异性半方差函数长轴变程2522 m>各向同性半方差函数变程1319.4 m>各向异性半方差函数短轴变程1078 m,揭示了不同方向石芽分布空间自相关距离的大小,

即在此距离范围内的任何两样点石芽数量都存在着一定的相关关系，其相关性随着距离的增加而减小，超过上述尺度以后，它们的空间自相关性差；石芽数量的空间自相关变异尺度，远远大于菹草石芽能够自行散落的距离，说明流水的带动起了很重要的扩散作用，这个结论有利于了解石芽扩散范围的大小。块金值(C_0)表示由实验误差和小于实际取样尺度引起的变异，空间结构比 $C/(C_0+C)$ 反映了空间结构系数在样点变量差异中所占的比率，空间结构比率越大，说明块金在基台值中占的相对比例较小，研究变量在小尺度空间内的变化较小；各向异性模型的空间结构比率大于 0.5，这表明在小尺度上(小于采样步长 213 m)石芽数量异质性不高，说明采样的密度合适^[11,15](应用 Arcmap 组件 Geostatistics 的 Kriging 插值过程中，在比较、选择异质性类型、

变异函数模型误差最小后，软件界面给出表 1 中参数值)。

与半方差函数理论模型拟合程度的高低主要按以下标准综合进行^[16]：① 平均误差 ME 的绝对值最接近于 0；② 标准化平均误差 MSE 最接近于 0；③ 平均标准误差 ASE 与均方根误差 RMSE 最接近；④ 标准化均方根误差 RMSSE 最接近于 1。结合实际调查数据的分析情况和几种不同的理论模型比较，确定石芽密度的各向异性半方差函数与球状模型拟合最好，反映出石芽在样地内呈聚集分布(表 2)。

2.2 石芽分布的分维数分析

分维数高说明在调查样地内，石芽的分布比较均匀^[17]。对于本研究样地空间异质性而言，全方向<椭圆半长轴方向(337.7°)<椭圆半短轴方向上(67.7°)(正北方向为 0°)(表 3)。

表 1 石芽密度半方差函数的理论模型参数
Tab. 1 Semivariogram model parameters of *P. crispus* turion density in Xuanwu Lake

异质性 Heterogeneity	变异函数模型 Variogram model	趋势阶数 Order of trend	变程 A_0 Range(m)		长轴方位角 Angle of majoraxis (°)	C_0	C_0+C	$C/(C_0+C)$	分布类型 Distribution type
			长轴	短轴					
各向同性	球状模型	1	1319.4			0.216	0.437	0.506	聚集分布
各向异性	球状模型	1	2522	1078	337.7	0.206	0.458	0.551	聚集分布

表 2 模型预测误差
Tab. 2 Prediction errors

异质性 Heterogeneity	ME	MSE	ASE	RMSE	RMSSE
各向同性	0.01109	0.0154	0.5627	0.5784	1.034
各向异性	0.0059	0.0089	0.5458	0.5708	1.053

表 3 石芽密度分维数
Tab. 3 Fractal dimension of *P. crispus* turion density

变异方向 Variation direction	分维数 D	显著性水平 Significance F
全方向	1.894	4.97871E-10
半长轴方向	1.866	1.96484E-18
半短轴方向	1.853	6.08E-10

2.3 石芽空间分布图分析

为了更直观地反映石芽在玄武湖中的分布状况，应用 Kriging 法的最优插值原理与方法，以玄武湖岸线为边界，对整个玄武湖石芽密度进行插值，并生成石芽密度的空间分布图(图 2)。从图 2 上可以看出：石芽密度在各湖中具有非常明显的空间异质性，东北湖石芽密度最大(均值 30.5 颗/ m^2)，西南湖密度最小(均值 10 颗/ m^2)；石芽高密度区域延伸的方向与进、出湖水主流线大体一致。

玄武湖石芽密度分布差异的主要原因：

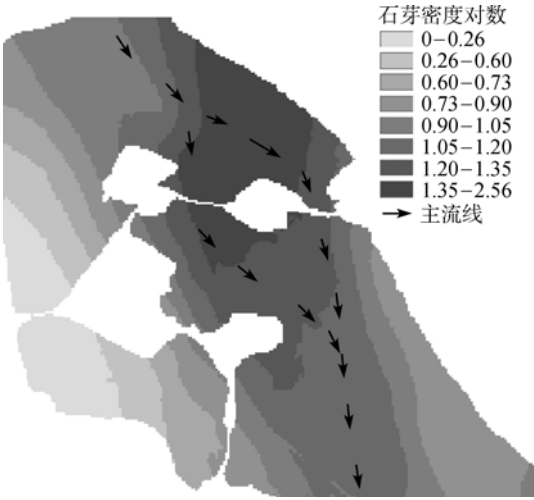


图 2 玄武湖石芽数量的空间分布图
Fig. 2 Spatial variation of *P. crispus* turion density

(1) 深水区域, 菹草密度低, 石芽产生量少。玄武湖平均水深 1.3—1.5 m, 西南湖、西北湖、东北湖中弘线水深一般 1.8—2.2 m(图 3), 2007 年 2—3 月份玄武湖的消光系数 0.82—1.53, 水越深, 水下光照越弱, 光照不足会抑制菹草幼苗的正常生长, 因而西南湖、西北湖、东北湖深水区域菹草密度较低(图 4, 将 400—988、100—400、0—100 株/m² 定为高、中、低密度)。

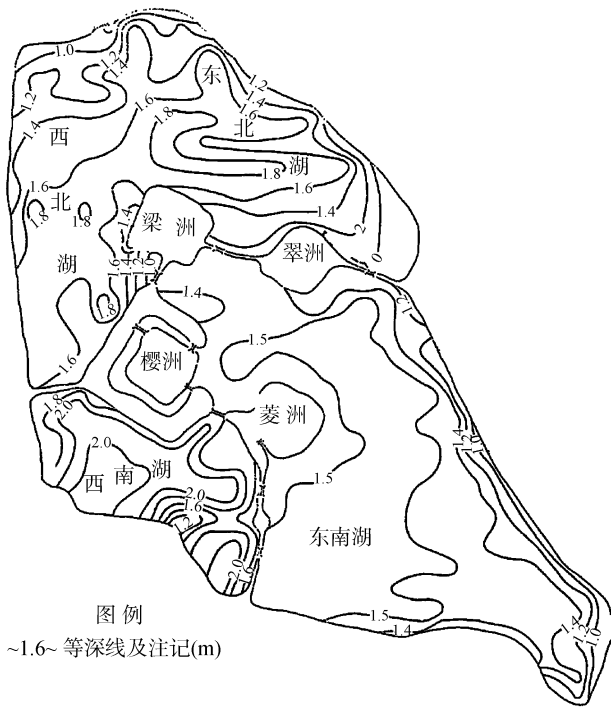


图 3 玄武湖等深线图
Fig. 3 Water depth contour of the Lake

(2) 硬质基底, 菹草密度低, 石芽产生量少。玄武湖中存在 3 中主要基质(表 4), 即熟泥(色暗黑)、黄泥、硬质基质(表层底泥较薄, 下层为沙砾、石块等), 硬质基质主要分布在部分驳岸岸边, 所占面积较小, 黄泥主要分布在北湖玄武湖隧道、东南湖九

华山隧道沿线, 其他为色暗的熟泥。基质硬质不利于菹草生根及从底泥吸收营养, 盖度 15%—20%, 菹草群丛密度一般为 30—150 株/m², 石芽产生量相应也减少。

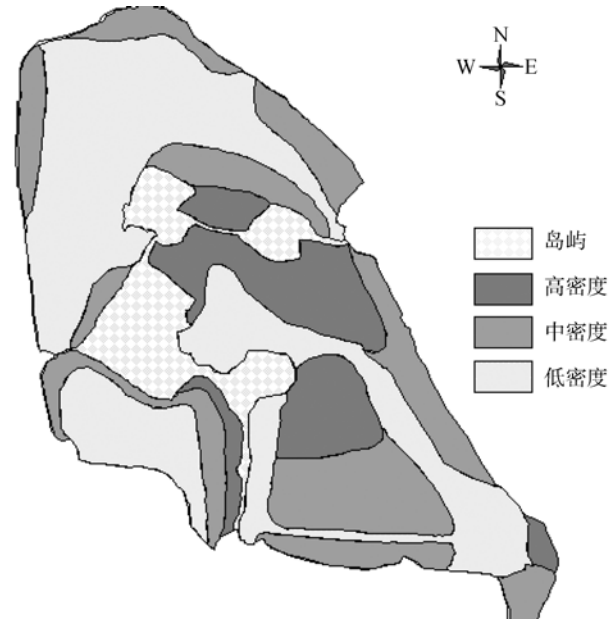


图 4 菹草密度差异图
Fig. 4 Spatial variation of *P. crispus* density

(3)人工干预(机械割草)程度不同, 对石芽分布影响很大。玄武湖为景观湖泊, 西南湖、西北湖、东南湖周围都设置了多家游船停泊码头, 为了给游船提供足够的空间, 玄武湖管理处在菹草生长的繁盛季节(3—6 月)不停地大规模割草, 石芽生长季节过度割草会造成新石芽不能形成或未成熟就掉落湖底, 成熟的石芽数量就大量减少。东北湖及东南湖北侧因为没有游船码头, 距离游览中心较远, 受到人为干扰相对较小, 石芽有更多机会得以成熟保留下来, 形成东北湖石芽密度相对高值区; 东南湖 2007 年春季菹草高密度区密度一般在 600—900 株

表 4 玄武湖底泥理化性质
Tab. 4 The bottom sediment characteristics of the Xuanwu Lake

基质类型 Substrate types	化学成分 Chemical constituents			物理性质 Physical properties		分布 Distributions
	TN (g/kg)	TP (g/kg)	TOC (%)	厚度(cm)	硬度	
熟泥 Mud	1.22	0.071	5.65	50—80	软	大部分湖底
黄泥 Clay	0.764	0.0532	0.866	30—50	较软	北湖玄武湖隧道、东南湖九华山隧道沿线
硬质基质 Hard substrates	—	—	—	3—10(上覆底泥)	硬	部分驳岸岸边

/m², 中密度区菹草密度 200—400 株/m², 在四个湖区中是最大的, 但由于高强度长时间割草干扰, 湖底石芽数量并不高(平均 19.4 颗/m², 图 2)。我们在野外观测到, 一株菹草成熟时可以结 20—50 颗石芽, 在不受干扰情况下, 按照 200—400 株/m² 计算, 玄武湖石芽密度应该达到 400—2000 颗/m²; 2008 年夏季, 我们在洪泽湖 18 个样点采底泥, 发现有 3 处石芽数量超过 800 颗/m²; Kunii, *et al.*^[3]也发现自然状况下菹草石芽密度可达 238—1648 颗/m²。由此可见, 玄武湖不适宜的割草方式已经严重损害菹草种子库的稳定性。

(4) 流水带动扩散作用, 扩大了石芽的分布范围。东南湖大部分水深在 1.3—1.5 m, 适合菹草生长, 是玄武湖 4 个小湖中菹草盖度最大、密度最大的一个湖泊, 通过持续不断高强度割草形成游船通道和水上运动学校训练通道(图 4 低密度区域), 这些通道水面上几乎没发现菹草, 石芽数量应该是极少的, 但调查表明该区域石芽密度仍然达到 15—30 颗/m², 显然这是由于风力推动湖水流动, 流水携带漂浮的石芽扩散、沉积作用形成。另外, 玄武湖来自长江的补水量达 28×10⁴ t/d, 补水入湖口在玄武湖东北角, 东北湖、西北湖是生态补水的接纳湖区, 补水主流线自北湖→东北湖两涵洞→东南湖→武庙闸出水(东南湖南部), 石芽高密度区域延伸的方向与进、出湖水主流线大体一致, 也说明了流水对石芽的携带、沉积作用(图 2)。

从以上分析可知, 利用空间分布图不仅可以很明显地看出菹草石芽在整个湖区空间分布状况, 而且有助于了解各区域石芽分布差异的原因、预测下一个生长季节菹草的分布状况、探讨菹草植被恢复中种子库所发挥的实际作用。这样比零散的采样数据更直观、有效, 更有利于人们针对于不同的区域采用相应的生态修复措施。

3 小 结

(1) 变异函数选择球状模型拟合石芽密度的变差曲线, 从预测误差判断, 拟合效果较好, 因此, 玄武湖石芽数量的空间分布图(图 2)比较真实地反映了玄武湖石芽空间分布状况。

(2) 石芽密度在各湖中具有非常明显的空间异质性, 东北湖石芽密度最大(均值 30.5 颗/m²), 西南湖密度最小(均值 10 颗/m²); 从石芽密度的分维数来

看石芽密度的空间异质性, 全方向<椭圆半长轴方向(337.7°)<椭圆半短轴方向上(67.7°)。

(3) 石芽密度的空间异质性产生的原因主要是割草干扰、种群数量、水深、水流、立地条件的空间异质性。

(4) 石芽数量的空间自相关尺度, 远远大于菹草石芽能够自行散落的距离, 说明流水的带动起了很重要的扩散作用, 这个结论有利于了解石芽扩散范围的大小。在野外进行调查时应把流水带动作用看作一个独立于菹草分布区以外的一个总体, 调查时样点的布设不应受到菹草分布区的局限。

参考文献:

- [1] Jian Y X, Wang J B, He G Q, *et al.* Effects of water-depth gradients, matrices, light and removal of plantlets on germination of tuitions of *Potamogeton crispus* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2001, **25**(3): 224—228 [简永兴, 王建波, 何国庆, 等. 水深、基质、光和去苗对菹草石芽萌发的影响. 水生生物学报, 2001, **25**(3): 224—228]
- [2] Rogers K H & C M Breen. Growth and reproduction of *Potamogeton crispus* in a South African Lake [J]. *J. Ecol.*, 1980, **68**: 561—571
- [3] Kunii H. Life cycle and growth of *Potamogeton crispus* L in shallow pond Ojage-ike [J]. *Bot. Mag.*, Tokyo, 1982, **95**: 109—124
- [4] Sastroutomo S S. Turion formation, dormancy, and germination in curly pondweed, *Potamogeton crispus* L [J]. *Aquat. Bot.*, 1981, **10**: 161—173
- [5] H Vereecken, J Baetens, P Viaene, *et al.* Ecological management of aquatic plants: effects in lowland streams [J]. *Hydrobiologia*, 2006, **570**: 205—210
- [6] H Coops, E H van Nes, M S van den Berg, *et al.* Promoting low-canopy macrophytes to compromise conservation and recreational navigation in a shallow lake [J]. *Aquatic Ecology*, 2002, **36**: 483—492
- [7] Li W C. “Yellow water” in East Taihu Lake caused by *Zizania Latifolia* and its prevention [J]. *Journal of Lake Science*, 1997, **9**(4): 364—368 [李文朝. 东太湖茭黄水发生原因与防治对策探讨. 湖泊科学, 1997, **9**(4): 364—368]
- [8] Xu J H. Mathematical methods in contemporary Geography (the Second Edition) [M]. Higher Education Press. 2002, 105—121 [徐建华. 现代地理学中的数学方法(第二版). 高等教育出版社. 2002, 105—121]
- [9] Liu R M, Wang X J, Wang C H, *et al.* Application of geostatistics in studying spatial distribution Chlorophyll a lakes [J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, **20**(5): 308—310 [刘瑞民, 王学军, 王翠红, 等. 应用地统计学方法研究湖泊叶绿素 a 的空间分布. 农业环境保护, 2001, **20**(5): 308—

- 310]
- [10] Wang X C, Han S J, Zou C J. Geostatistical analysis of the pattern of *Betula ermanii* population in Changbai Mountain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(7): 781—784 [王晓春, 韩士杰, 邹春静. 长白山岳桦种群格局的地统计学分析. 应用生态学报, 2002, **13**(7): 781—784]
- [11] Pan W B, Deng H B, Tang T, *et al.* Application of geostatistical analysis in study of macrophytes community's pattern [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(10): 1692—1696 [潘文斌, 邓红兵, 唐涛, 等. 地统计学在水生植物群落格局研究中的应用. 应用生态学报, 2003, **14**(10): 1692—1696]
- [12] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature [M]. San Francis-cos: W. H. Freeman. 1983
- [13] Falconer K. Fractal geometry: Mathematical foundations and applica-tions [M]. New York: Wiley. 1990
- [14] Liu R M, Wang X J, Zheng Y, *et al.* The application of geo-statistics in the study of water quality of Taihu Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantai*, 2002, **22**(2): 209—212 [刘瑞民, 王学军, 郑一, 等. 地统计学在太湖水质研究中的应用. 环境科学学报, 2002, **22**(2): 209—212]
- [15] Wang T Y, Wang G X. Spatial distribution of water quality parameters in Lake Chuncheng [J]. *Acta Scientiae Circumstantai*, 2007, **27**(8): 1384—1390 [王天阳, 王国祥. 昆承湖水水质参数空间分布特征研究. 环境科学学报, 2007, **27**(8): 1384—1390]
- [16] Tang G A, Yang X. ArcGIS geography information system spatial analysis experiment course [M]. Science Press. 2006, 404—405 [汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程. 科学出版社, 2006. 404—405]
- [17] Zhao B, Cai Q H. Preliminary study on fractal character of spatial pattern freshwater ecosystem [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, **24**(5): 474—480 [赵斌, 蔡庆华. 分形理论对水生生态系统空间格局研究初探. 水生生物学报, 2000, **24**(5): 474—480]

SPATIAL VARIATION OF *POTAMOGETON CRISPUS* TURION AND ITS CAUSES OF FORMATION IN XUANWU LAKE OF NANJING

YANG Wen-Bin^{1,2}, WANG Guo-Xiang² and WANG Gang^{1,3}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Anhui Normal University, Wuhu 241003;

2. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046

3. School of Urban and Resources Environment, Yancheng Teachers University, Yancheng 224002)

Abstract: In order to investigate the spatial distribution of the *Potamogeton crispus* turion in Xuanwu Lake, a total of 52 samples were collected by the grid method. In each sampling site positioned by GPS, four samples of *P. crispus* turion from 15cm depth under surface sediment were collected, summing the data to represent turion density of the site. Spatial variation of *P. crispus* turion density in the Lake was studied by using the geostatistical component of ArcGIS. Compared with traditional statistical methods, the geostatistic method took directivity, distance and location of sampling points into account. Semivariogram is the specific theory of the method, it can be used to research the spatial correlation and the spatial pattern by determining differences of regional variable among equidistant sampling sites. The survey data converted by Log function were close to normal distribution and could be discussed by semivariogram. Theoretical model and curve graph of regional variable were derived respectively after calculating semivariogram of all possible distance interval, and spatial variation pattern about regional variable could be analyzed quantitatively by model parameters such as nugget, sill, range, fractal dimension etc.. Furthermore, the spatial variation map of *P. crispus* turion was drawn by the method of Kriging interpolation. The results showed: ① The semivariogram of *P. crispus* turion density fitted spherical model and exhibited an intense special aggregation. ② Spatial heterogeneity of *Potamogeton crispus* turion density existed obviously, that is, an average density of *P. crispus* turion in the North-east Lake and the North-west was 30.5 and 10 ind./m² respectively; Omnidirectional, elliptic semi-major axis and elliptic semi-minor axis fractal dimension decreased; ③ Mowing and differences of population size, water depth, substrate led to spatial variability of the density; ④ The scale size of spatial auto correlation of the density was bigger than distance of the turion fallout itself, which showed flowing water played an important role in the turion diffusion.

Key words: Turion density; Spatial variation; Geostatistics