

太湖水体遥感反演参数的空间异质性^{*}

刘晓峰^{1,2}, 段洪涛^{1**}, 马荣华¹

(1:中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室,南京 210008)

(2:南京大学地理与海洋科学学院,南京 210093)

摘要:空间异质性的存在,会导致水质参数遥感反演中的尺度效应,影响反演精度,因此通过分析水质参数空间异质性,对于选择适当分辨率的遥感影像,提高反演精度具有重要意义。通过2008年10月在太湖布置的3个样方,利用GIS地统计学原理和分形维数的方法,对水质遥感反演中的三要素浓度,包括叶绿素a(Chl. a)、总悬浮物(TSM)和溶解有机碳(DOC)的空间异质性及其可能产生的尺度效应进行了研究。结果表明:太湖水体的三要素浓度在不同样方单元中变异系数相差较大,存在着明显的尺度效应;三个样方内Chl. a变异函数曲线斜率在变程范围内变化都较为剧烈,分形维数较高,说明太湖水体Chl. a受到某种起主导作用的生态过程的影响和控制;Chl. a和TSM的空间结构比例都在90%左右,有较强的空间相关性,表明其空间异质性的产生主要是由于结构性因素引起的,随机性因素作用微弱;DOC空间结构比例较小,说明随机性因素对其空间异质性的产生起了主导作用。三个样方中Chl. a的变程分别为147.3m、129.3m和115.0m,TSM的变程分别为1131.7m、130.6m、149.1m,因此在遥感反演中可选择TM影像,选择5×5窗口,以150m×150m作为基本单元;而DOC的变程分别为34.3m、38.5m、26.4m,表明其自相关距离较小,建议直接选择分辨率为30m的TM影像,使实际测量值与遥感影像最小单元相对应,消除反演过程中的尺度效应带来的误差。该研究也表明,MODIS的像元尺寸(250、500、1000m)明显偏大,在太湖水体三要素反演过程中,由于空间异质性引起的尺度效应,会造成一定的误差。

关键词:空间异质性;尺度效应;分形;半方差变异函数;太湖

The spatial heterogeneity of water quality variables in Lake Taihu, China

LIU Xiaofeng^{1,2}, DUAN Hongtao¹ & MA Ronghua¹

(1:State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2:School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, P. R. China)

Abstract: Spatial heterogeneity results in marked scaling effect and influences retrieval precision in the retrieval of water from remote sensing image, so the research on the spatial heterogeneity benefit to choose suitable resolution remote sensing image and increase retrieval precision. A study was conducted to set sampling points of water in Lake Taihu in October, 2008. The research analyzed three essential factors' spatial heterogeneity and scaling effect in the water quality retrieval, that is, chlorophyll-a (Chl. a), the total suspended matter (TSM) and the dissolved organic carbon (DOC) using the Geostatistics principle and the fractal dimension method. The result showed that three essential factors of Lake Taihu had different coefficient of variation in different sampling areas and had marked scaling effect. Furthermore, the semi-variogram curves of Chl. a in three sampling areas changed fiercely in range and the fractal dimension was high, which shows Chl. a in Lake Taihu was possibly controlled by some leadership ecological processes. Spatial structure proportion of Chl. a and TSM was higher, about 90%, and had strongly spatial relevance, which indicated that the spatial heterogeneity was mainly caused by the constitutive factors, while random factors played less role. DOC had lower spatial structure proportion, which indicated it was mainly affected by random factors. In three sampling areas, the range of

* 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(CXNIGLAS200807)、中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项资金”项目(07YJ011001)和国家自然科学基金项目(40801137,40871168)联合资助。2009-07-03 收稿；2009-10-12 收修改稿。刘晓峰,男,1985 年生,硕士研究生;E-mail:she83920097@sina.com.

** 通讯作者;E-mail:htduan@niglas.ac.cn.

Chl. a was 147.3m, 129.3m, 115.0m, and TSM was 1131.7m, 130.6m, 149.1m, so 150m × 150m as the smallest unit and 5 by 5 of TM was appropriate to estimate them during the retrieval process. The range of DOC was 34.3m, 38.5m, 26.4m, which indicated that the autocorrelation distance was small, so 30m × 30m as the smallest sampling unit and choose TM image which resolution was 30m to correspond observed values with the smallest unit of remote sensing image. The research also indicated the MODIS pixel size (250, 500, 1000m) was so large in the retrieval of Lake Taihu, and it may bring retrieval error with result of spatial heterogeneity.

Keywords: Spatial heterogeneity; scaling effect; semi-variogram; fractal dimension; Lake Taihu

水体的光谱特征主要是由水体本身及其物质组成决定,湖泊水体中影响光强度及光谱分布的物质大致可分为3类:浮游藻类色素,悬浮物质和黄色物质。浮游藻类色素、悬浮物质通常以叶绿素a(Chlorophyll-a, Chl. a)和总悬浮物(Total Suspended Matter, TSM)表征^[1];而黄色物质是溶解有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)中呈黄色的那部分物质(在黄光波段吸收较小),占DOC的大部分,因此一般以DOC表征黄色物质^[2]。这些参数都是水质遥感中通常反演的指标^[3]。

利用卫星影像对水质参数进行遥感反演,一般是通过分析水质参数和遥感反射率间的关系,建立水质参数遥感反演模型。而在实际研究过程中,往往是把野外采样获得的点数据和不同空间分辨率的遥感像元面数据建立有效联系。然而,由于空间异质性的客观存在,水体在不同尺度上往往会展现出不同的特征,遥感影像上像元大小不同,反应的地物特征也不同。因此,实测点数据与遥感面数据间存在一定的差异,而这些差异往往会导致遥感定量反演的误差。

目前,空间异质性和尺度问题在生态学和水文学领域已经得到了比较广泛的研究^[4]。万华伟和王锦地对植被波谱遥感反演空间尺度效应产生的原因进行了初步研究^[5];涂长永和费龙研究了如何利用地统计学原理对水体悬浮固体浓度进行空间异质性分析^[6];唐涛和蔡庆华研究了在水生态领域如何布点才能直接测定空间结构的相关性和依赖性,研究有一定随机性和结构性的各种定量的空间分布规律^[7];陈健和倪绍祥认为,准确的描述LAI的空间异质性,可以为不同尺度的遥感数据反演LAI和进行不同尺度的遥感数据的相互转换提供理论基础^[8]。上述研究均指出尺度效应的本质是空间异质性,只有准确把握各种生态过程的空间变异规律,才能明确其尺度效应,确定同质的基本单元。

本文以太湖为研究区域,参考TM、MODIS等遥感影像空间分辨率(30m、250m、500m和1000m),布置样方,获取水体参数;同时结合GIS地统计学原理和技术,分析了水体三要素Chl. a、TSM和DOC在水体中的空间变异特征,应用地统计学中的半变异函数对研究区水体指标的空间异质性进行定量描述;另外应用分形理论中分形维数来鉴定尺度与水体中Chl. a、TSM和DOC的关系,寻找其自相似性规律。本文研究的主要目的在于针对不同水质参数空间变异特点,确定同质最小单元,选择合适空间分辨率的遥感影像,减少水质参数遥感反演中由于尺度效应造成的误差,以及进一步为野外样点布设和点面数据转换提供研究基础,提高水体三要素的遥感反演精度。

1 研究方法

1.1 样方布置和数据获取

2008年10月8日对太湖进行采样点布设,考虑到太湖水体的多样性,选择太湖典型区域(东部水域、西部水域;南部水域,北部水域),布置了3个样方(图1),同时鉴于水面采样的困难性,每个样方内布设16个采样点,利用差分GPS(精度厘米级)定位导航,参考目前常用的TM、MODIS影像空间分辨率(30m、250m、500m、1000m),按照30m × 30m, 150m × 150m, 250m × 250m, 750m × 750m, 1000m × 1000m设置采样点,因此,样方水体具有一定代表性。采集水样返回实验室进行分析:叶绿素a含量采用分光光度法测定,即用0.45μm的Whatman GF/C滤纸过滤,90%热乙醇提取,然后用7230分光光度计检测、计算;悬浮物含量的测定采用电子天平称重法,即用灼烧后的GF/C滤纸过滤,烘干,冷却,计算。DOC的测定方法是用Whatman GF/F玻璃纤维滤膜(直径25mm)过滤水样,在1020型TOC仪进行测定。

1.2 地统计分析建模

当一个变量呈现为空间分布时,就称之为区域化变量(regionalized variable)^[7]。太湖水体中的Chl. a、

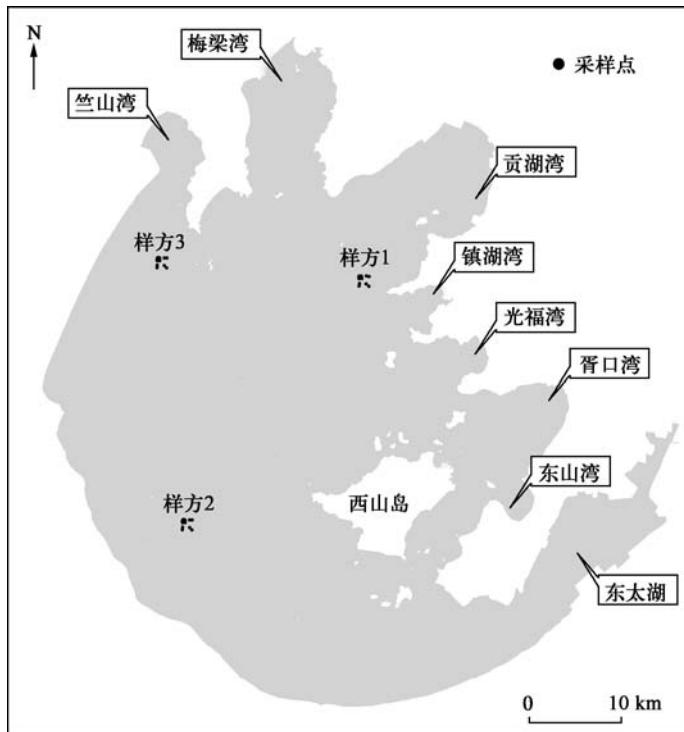


图 1 太湖水体采样点分布

Fig. 1 Sampling points in Lake Taihu

TSM 和 DOC 均是区域化随机变量,采用地统计分析中所特有的半方差变异函数来分析它们的空间结构特征和变异规律. 半方差函数离散计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中, $\gamma(h)$ 为半方差, $Z(x)$ 为一区域化随机变量, 并满足二阶平稳假设, h 为两样本点空间分隔距离, 称为步长(lag), $N(h)$ 是距离为 h 的点对的数量. 步长按照半方差函数有效性基本要求来确定, h 应大于采样点间最小距离, 同时 h 与 $N(h)$ 的乘积应小于最大样点间距离的 $1/2$, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别是区域化变量在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 处的实测值^[9]. 以 h 为横坐标, $\gamma(h)$ 为纵坐标, 画出半方差变异函数曲线图(图 2), 就可以揭示对象的空间相关范围的大小, 直接展示区域化变量 $Z(x)$ 的空间变异特点.

半方差变异函数有 3 个非常重要的参数, 即基台值(sill)、变程(range)或称空间依赖范围(range of spatial dependence)、块金值(nugget), 3 个参数可从变异函数曲线图直接得到^[10]. 当变异函数随着间隔距离 h 的增大, 从非零值达到一个相对稳定的常数时, 该常数即为基台值 $C_0 + C$; 当间隔距离 $h = 0$ 时, $\gamma(0) = C_0$, 该值为块金值. 基台值是系统或系统属性中最大的变

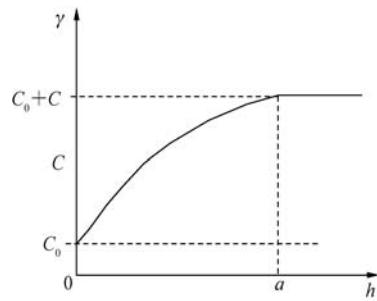


图 2 半方差曲线特征参数图

Fig. 2 Characteristic parameters of semi-variogram

异,块金值表示区域化变量在小于抽样尺度时非连续变异,由区域化变量的属性或测量误差决定. 变异函数达到基台值时的间隔距离 a 称为变程^[11]. 如果两点间间隔 $h < a$, 两点处的个体是相互影响的, 相反则互无影响, 在实际操作中, 通常将采样间隔略大于 a , 此时区域化变量 $Z(x)$ 空间相关性消失.

在半方差函数的基础上, 引入分形理论, 目的是通过研究水体三要素在不同尺度下的空间分布情况, 寻找其自相似性规律, 最终结果就分形维数(Fractal dimension), 该参数是对物体独立于尺度的共同特征的表征. 分形维数的定义有许多种, 而且对同一对象以不同方式定义的分形维数其意义也各不相同^[12], 本文中分维数由变异函数 γ 和间隔距离 h 之间的关系确定, 其公式为:

$$\gamma(h) = h^{(4-2D)} \quad (2)$$

对公式(2)进一步简化可得:

$$D = 2 - \frac{1}{2} \frac{\ln \gamma(h)}{\ln h} \quad (3)$$

分形维数 D 是一个无量纲数, 可以作为随机变异的量度, 进一步反映空间异质性随空间尺度变化的特征. 从公式(3)可以看出: 分形维数 D 的大小与双对数半方差曲线的斜率密切相关, 因此文本用双对数半方差图来推求分形维数. 当分形维数 $D=2$ 时, 双对数半方差曲线的斜率为 0, 双对数半方差曲线图呈水平直线状, 在统计学意义上表示所有间隔样点间的差异性都相同, 即研究对象在样方内特征相同, 是同质的, 在研究中可把同质区的最小尺度确定为最小采样面积; 双对数曲线图中的直线越陡, 表明不同尺度间隔的差异性越显著, 研究对象的空间异质性越强^[13].

2 结果与分析

2.1 水质三要素的空间统计特征

太湖水体 48 个样本点三要素浓度在不同尺度样方单元中的统计结果(表 1)表明, 从平均值可以看出, 太湖水体中同一种水质参数在不同的样方里的浓度差异很大, 这主要是由于太湖面积较大, 三个样方所代表的水质情况有所差异, 导致浓度变化明显, 因此对三个样方水质参数异质性分析结果进行综合考虑分析, 研究其空间异质性, 以及所带来的尺度效应, 具有一定的空间代表性.

通过比较不同样方三要素浓度的变异系数可以看出, 同一种水质参数在不同尺度的样方单元中变异系数各不相同. 样方 1 中水体 Chl. a 的变异系数在 30m 的尺度下是 28.81%, 在 1000m 尺度下变为 80.72%, 相差了 51.91%; 样方 2 的 Chl. a 变异系数最大值和最小值分别为 122.27% 和 68.29%, 相差了 53.98%; 而样方 3 中 Chl. a 变异系数稍微偏低, 在 16.91%–28.56% 之间. 这表明, 太湖水体水质存在着明显的尺度效应. 另外, 在样方 1 中, 不同尺度下 TSM 和 DOC 的变异系数相比 Chl. a 相对较小; 样方 2 中 1000m 尺度下的 Chl. a 的变异系数为 122.27%, 而 TSM 和 DOC 的变异系数分别为 71.23% 和 25.82%, 相差较大; 样方 3 中不同尺度下 Chl. a 和 DOC 的变异系数相差不大, 但远大于 TSM 的变异系数, 这表明太湖水体中不同水质指标的变异程度有很大的区别, 不同水体参数在不同水域所受的影响因素不一致. 而在不同样方中, 样方 2 中 Chl. a 和 TSM 在不同尺度下的变异系数一般都大于样方 1 和样方 3, 而 DOC 变异系数与其它样方相差不大, 这是由于样方 2 处于蓝藻水华富集区, 而由于藻华富集程度的不同, Chl. a 和 TSM 表现出更大的差异性. 总的来说, TSM 和 DOC 浓度在不同的样方单元中变异系数都比较小, 变异程度不大, 较低的变异系数表明影响 TSM 和 DOC 含量在水体中分布的生态因素较为单一, 且随水文条件的变化不大. 比较三个样方的 Chl. a, 随着样方单元面积的增大, 样方 1 水体中叶绿素含量的变异系数先增大后减小再增大, 样方 2 和样方 3 叶绿素含量的变异系数先减小后增大, 最小值范围在 150–250m 尺度范围内, 推测 Chl. a 其单点采样所代表的水域面积约为 150m × 150m, 甚至更小, 具体值可通过半方差分析获得. 样方 1 和样方 3 中 TSM 变异系数随着样方单元面积的增大呈先减小后增大的趋势, 样方 2 中 TSM 变异系数表现为 2 个阶段, 250m × 250m 之前稳定在 30% 左右, 之后升高为 70% 左右. DOC 变异系数在不同样方中随采样单元尺度变化幅度不大, 特点明显, 表现较为稳定, 空间异质性不强.

表 1 太湖水样指标统计特征
Tab. 1 The statistical values of water quality variables of Lake Taihu

样方单元	水质参数	最大值			最小值			平均值			变异系数(%)		
		样方 1	样方 2	样方 3	样方 1	样方 2	样方 3	样方 1	样方 2	样方 3	样方 1	样方 2	样方 3
30 × 30	Chl. a(μg/L)	40.62	196.16	24.81	23.22	26.23	15.91	31.73	120.20	20.81	28.81	73.54	19.64
	TSM(mg/L)	51.60	76.50	63.25	44.80	47.00	54.00	47.88	59.17	56.75	6.21	21.35	7.72
	DOC(mg/L)	6.51	4.33	5.96	3.54	2.64	3.68	5.474	3.55	4.96	24.66	22.89	20.21
150 × 150	Chl. a(μg/L)	40.62	259.69	24.81	10.32	26.23	15.91	23.86	126.59	19.65	50.40	72.92	16.91
	TSM(mg/L)	51.60	83.50	63.25	44.00	31.67	53.50	46.71	57.48	56.14	5.74	30.82	5.92
	DOC(mg/L)	8.55	4.33	5.96	3.54	2.64	3.68	6.264	3.68	4.89	24.04	16.43	17.92
250 × 250	Chl. a(μg/L)	40.62	259.69	31.34	10.32	26.23	12.91	24.54	127.56	19.99	44.32	68.29	26.32
	TSM(mg/L)	51.60	100	63.25	43.33	31.67	46.75	46.53	62.27	55.25	5.54	33.25	7.34
	DOC(mg/L)	8.55	4.33	8.61	3.54	2.261	3.68	6.17	3.63	5.12	20.55	19.79	28.35
750 × 750	Chl. a(μg/L)	86.30	685.14	31.34	10.32	26.23	12.88	34.94	155.86	18.83	66.39	115.19	27.18
	TSM(mg/L)	51.60	246	63.25	39.00	31.67	30.50	46.13	74.54	51.98	7.51	73.49	15.51
	DOC(mg/L)	8.70	5.64	8.61	3.54	2.261	3.68	6.34	3.67	5.27	20.69	24.68	28.5
1000 × 1000	Chl. a(μg/L)	125.49	685.14	31.34	10.32	26.23	10.86	38.89	136.02	18.05	80.72	122.27	28.56
	TSM(mg/L)	64.40	246	63.25	39.00	31.67	30.50	47.25	70.10	51.34	12.48	71.23	15.49
	DOC(mg/L)	8.70	5.64	8.61	3.54	2.19	3.68	6.22	3.68	5.26	19.67	25.82	27.22

2.2 三要素空间异质性分析

在对太湖水体三要素浓度进行半方差分析前,按照地统计学空间相关分析的要求,应作对数变换使其基本符合正态分布趋势。在采用半方差函数分析太湖水体三要素浓度空间异质性时,应先选择合适的模型,计算试验变差函数,并在此基础上进行拟合。地统计学中的半方差图模型类型有很多,主要包括:线性模型、具有阈值的线性模型、球面模型、指数模型、高斯模型,其中较常使用的主要球面模型、指数模型和高斯模型。选择何种模型拟合样本半方差图是较为复杂的过程,一般是根据样本半方差图形状来选择,也可以根据研究目的来确定模型的形式。另外,根据相关指数的大小选择模型也是一种直接和简便的方法^[14]。本文主要是根据样本方差图的形状选择相应模型,其中样方 1 中的 Chl. a 和 DOC 的变异函数应用高斯模型拟合,TSM 选择球状模型拟合;样方 2 和样方 3 中的三要素浓度均选择球状模型拟合。Chl. a、总悬浮物浓度和 DOC 在各向同性条件下半方差变异函数曲线图(图 3)表明,试验中选取的模型较好地拟合了各指标的空间变异规律。三个样方内三要素浓度的变异函数曲线斜率在变程范围内变化都较为剧烈,说明该尺度上太湖水体中三要素浓度分布存在明显的异质性;三个样方中 DOC 的半方差 r 没有发生较大的变化,稳定在 1 左右,表明 DOC 受水体母质等主导因素的影响不大,这可能是由于影响 DOC 的生态因素有很多,且各种生态过程的影响权重大致相同^[13];三个样方内 Chl. a 和 TSM 的 r 值都较大,表明其在变程范围内的浓度差异大,其空间异质性明显高于 DOC;另外,不同样方的 Chl. a 和 TSM 的 r 值差别较大,尤其是样方 2 内 Chl. a 和 TSM 的半方差值明显大于其它两个样方,表明 Chl. a 和 TSM 受水质的影响较大。

变异函数的理论模型及有关空间异质性的参数见表 2。比较各指标的块金值可以发现,在样方 1、2 中,水体中 Chl. a 块金值较高,块金效应明显,表明小范围内的测量误差不可忽视;TSM 和 DOC 块金值都很小,表明小范围内生态水文过程不会对其整体分布特征产生影响;样方 3 中三要素浓度的块金值较小且相差不大,Chl. a 块金值偏大,表明样方 3 所代表的水体生态环境与样方 1、2 有很大的区别;样方 1、2 水体中 Chl. a、TSM 浓度都具有很高的空间结构比例,都在 90% 以上,反映出其较强的空间相关性,即其空间异质性的产生主要是由水体水质等结构性因素引起的,DOC 空间结构比例较小,说明污染物的排放等人为的或者随机性的因素对其空间异质性的产生起了主导作用。样方 3 中 Chl. a 和 TSM 的空间结构比例较高,在 88% 左右,有较强的空间相关性,DOC 的空间结构比例为 67.0%,说明在样方 3 中影响三要素浓度的水质因素对其作用程度大致相同,可能是由于水体水质分布较为均一所致。

从变程上看,三个样方中 Chl. a 的变程分别为 147.3m、129.3m 和 115.0m,在实际采样过程中,最小采

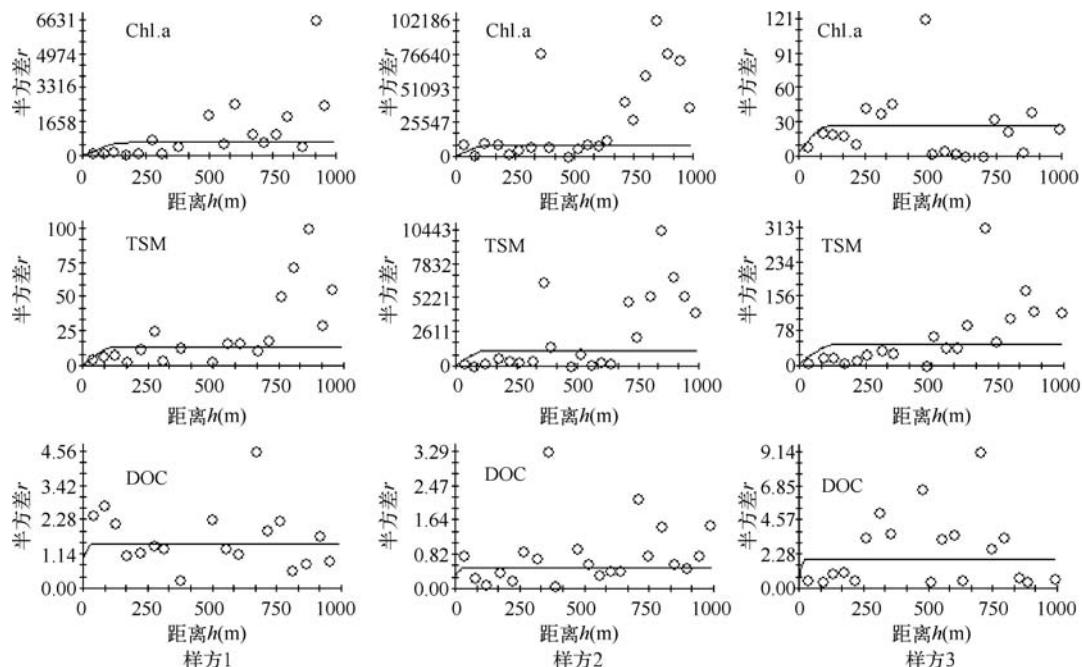


图3 太湖水体 Chl. a、TSM 和 DOC 半方差函数

Fig. 3 Semi-variogram of Chl. a, TSM and DOC in Lake Taihu

样单元的选择一般要大于自相关距离(变程),针对TM影像,在布点过程中以 $150\text{m} \times 150\text{m}$ 作为最小单元,选择 5×5 窗口。三个样方中TSM的变程分别为 131.7m 、 130.6m 、 149.1m ,在布点过程中以 $150\text{m} \times 150\text{m}$ 作为最小单元,针对TM影像,同样选择 5×5 窗口;同时,采样过程中可在每个最小单元中随机布设几个采样点取其平均值作为该采样单元水质参数的测量值。三个样方中DOC的变程分别为 34.3m 、 38.5m 、 26.4m ,考虑到水体采样过程应该尽量简单易行,且其变程与 30m 相差很小,因此,在采样点的布设过程中,可统一以 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 作为最小的采样单元。在遥感反演DOC时,建议选择分辨率为 30m 的TM影像,使实际测量值与遥感影像最小单元相对应,消除反演过程中的尺度效应带来的误差。

表2 太湖水体三要素变异函数特征参数

Tab. 2 Semi-variogram parameters of water quality variables in Lake Taihu

样方	指标	理论模型	块金值	基台值	变程(m)	空间结构比例(%)
样方 1	Chl. a($\mu\text{g/L}$)	高斯模型	50.0	641.91	147.3	92.2
	TSM(mg/L)	球状模型	0.10	13.52	130.6	99.3
	DOC(mg/L)	高斯模型	1.01	1.49	34.3	32.0
样方 2	Chl. a($\mu\text{g/L}$)	球状模型	100.00	7868.35	129.3	98.7
	TSM(mg/L)	球状模型	10.00	1206.12	131.7	99.2
	DOC(mg/L)	球状模型	0.29	0.51	38.5	42.9
样方 3	Chl. a($\mu\text{g/L}$)	球状模型	3.16	26.42	115.0	88.0
	TSM(mg/L)	球状模型	5.63	48.13	149.1	88.3
	DOC(mg/L)	球状模型	0.64	1.94	26.4	67.0

2.3 分形维数与尺度效应

太湖水体三要素浓度的分维数图表明,所有样方三要素浓度在空间分布上都存在明显的尺度效应,其分形维数图的直线较陡,变化剧烈,表明小尺度范围内的差异性比较显著,空间异质性较强;双对数曲线总体上呈现线性相关性,表明太湖水体中三要素浓度具有显著的分形特征,在研究范围内存在尺度效应(图

4). 比较每个样方的三要素浓度分维数, DOC 的分形维数较低, 说明 DOC 浓度的空间变异的复杂程度较低, Chl. a 和 TSM 浓度的分形维数较高, 表明其空间变异性较为剧烈. Chl. a 和 TSM 浓度变异函数空间结构比例大, 分维数也大, DOC 空间结构比例小, 分维数也小, 不符合空间结构比例大而导致随机因素作用小、分维数也小的理论规律, 表明它们在水生态系统中受生态因子的影响不具有同一性^[15].

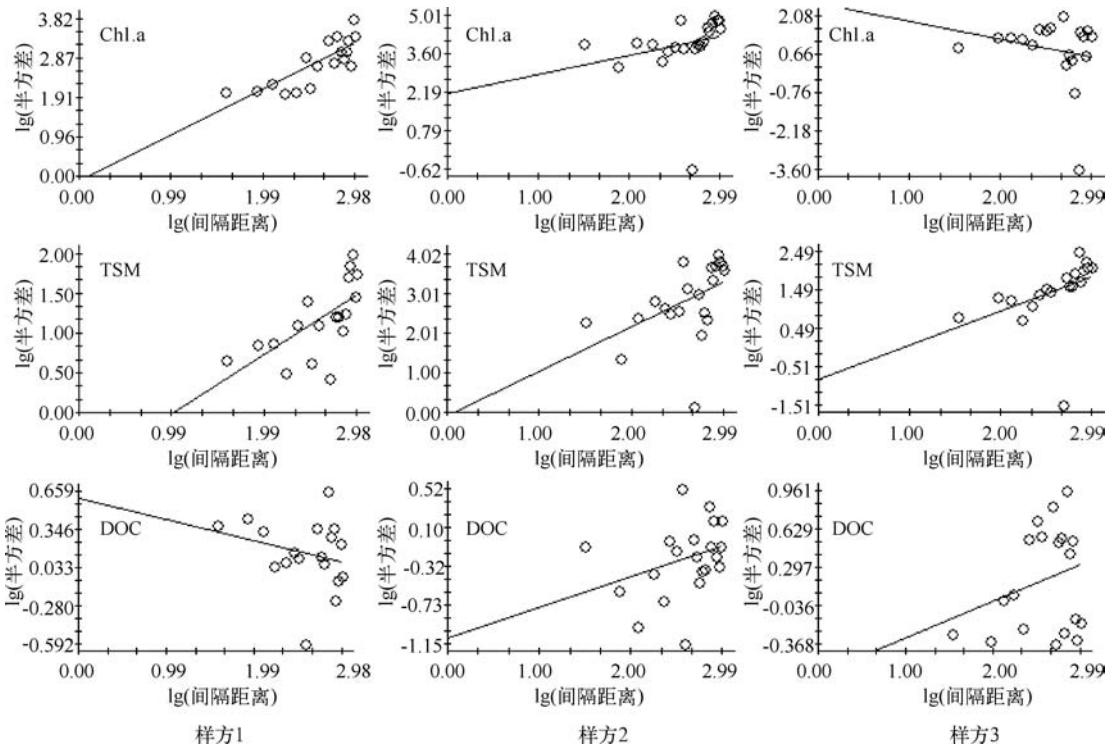


图 4 太湖水体三要素分维数

Fig. 4 Fractal dimension of Chl. a, TSM and DOC in Lake Taihu

在空间变异性分析的基础上, 对样方内三要素浓度进行普通克里格插值, 预测各指标的空间分布, 结果表明样方 2 中 Chl. a 和 TSM 浓度的空间分布情况大致相似(图 5), 样方 1、3 中 Chl. a 和 TSM 浓度分布虽没有明显相似的分布趋势, 但二者之间最大最小值的分布范围大致相同, 这可能是由于太湖水体中影响 Chl. a 和 TSM 的生态过程具有相关性或者影响 Chl. a 和 TSM 空间分布的生态因子中存在公共因子; 样方 2 中三要素浓度空间分布有明显相似性, 表明在样方 2 中三要素浓度的分布可能受到某一主导因素的影响, 使三者分布大体相同.

3 结论

太湖水体中 Chl. a 和 TSM 浓度都具有很高的空间结构比例和较强的空间相关性, 其空间异质性的产生主要是由水体水质的结构性因素引起的, 但 DOC 空间结构比例较小, 说明随机性因素对其空间异质性的产生起了主导作用. 从变程上看, Chl. a 和 TSM 浓度变程相近, 说明两者在水体中的空间自相关范围有较明显的相似性, 两者的空间分布格局也大致相似, 再次证明影响二者的生态因子之间具有相关性. 尺度选择的不同, 可能会导致对所研究对象的过程及其相互作用规律不同程度的把握, 最终会影响到研究成果的科学性和实用性. 分析表明太湖水体各指标存在着明显尺度效应, 根据异质性分析所确定的变程, Chl. a、TSM 浓度变程值相近, 可统一以 $150\text{m} \times 150\text{m}$ 作为其采样点所能代表的最小单元, 因此在遥感反演中可选择 TM 影像, 选择 5×5 窗口, 以 $150\text{m} \times 150\text{m}$ 作为基本单元与其对应; DOC 的变程分别与 TM 的分辨率相近, 建议直

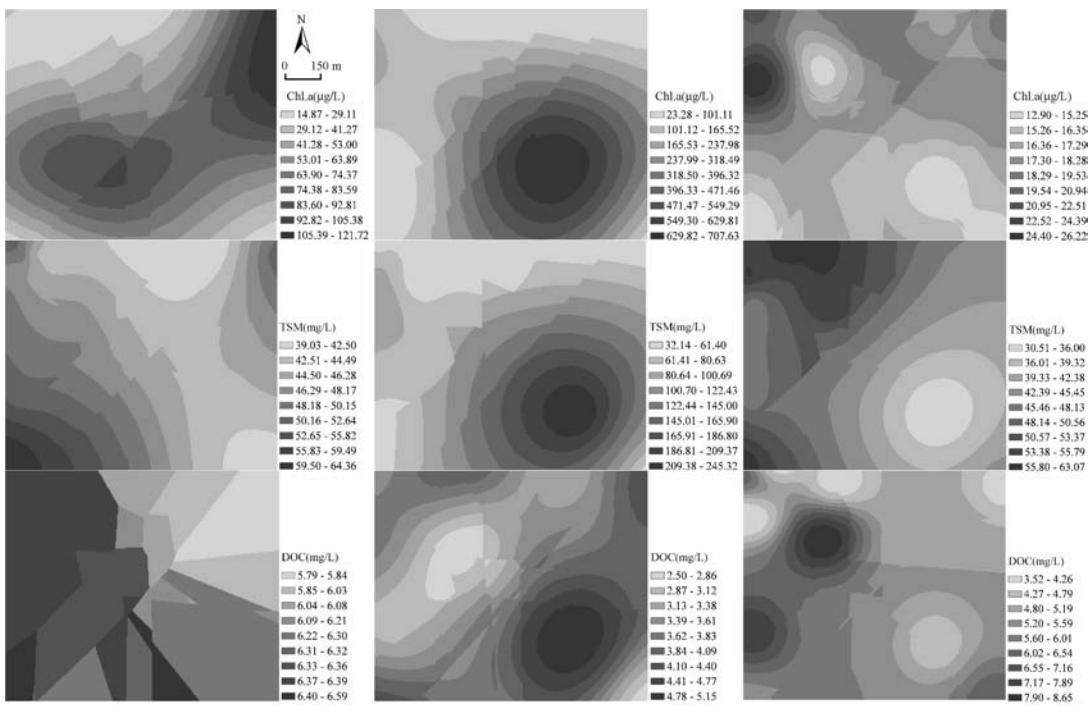


图 5 太湖水体三要素空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of Chl. a, TSM and DOC in Lake Taihu

接选择分辨率为30m的TM影像,使实际测量值与遥感影像最小单元相对应,消除反演过程中的尺度效应带来的误差,在今后对太湖水体进行大面积遥感监测时,可以依此为参考,针对研究对象的不同,选择不同的分辨率的遥感影像或对遥感影像进行尺度转换,消除尺度效应,提高监测精度。研究同时表明MODIS影像在太湖水体三要素反演过程中,像元尺寸(250、500、1000m)明显偏大,由于空间异质性引起的尺度效应,会造成一定的误差。

4 参考文献

- [1] 段洪涛,于磊,张柏等.查干湖富营养化状况高光谱遥感评价研究.环境科学学报,2006,26(6):1210-1226.
- [2] 段洪涛,马荣华,孔维娟等.太湖沿岸水体CDOM吸收光谱特性研究.湖泊科学,2009,21(2):242-247.
- [3] 平仲良.用实测海水透明度数据和NOAA卫星数据计算黄海悬浮体含量.海洋与湖沼,1993,24(1):24-30.
- [4] 傅国斌,李丽娟,刘昌明.遥感水文应用中的尺度问题.地球科学进展,2001,16(6):755-760.
- [5] 万华伟,王锦地.植被波谱空间尺度效应及尺度转换方法初步研究.遥感学报,2008,12(4):538-545.
- [6] 涂长永,费龙.福清市近岸水体悬浮固体浓度空间异质性分析.长春师范学院学报(自然科学版),2006,25(6):86-89.
- [7] 唐涛,蔡庆华.地统计学在淡水生态学中的应用.湖泊科学,2000,12(3):280-288.
- [8] 陈健,倪绍祥.植被叶面积指数遥感反演的尺度效应及空间变异性.生态学报,2006,26(5):1502-1508.
- [9] 朱益玲,刘洪斌.江津市紫色土中N、P养分元素区域空间变异性研究.环境科学,2004,25(1):138-143.
- [10] 王政权.地统计学及在生态学中的应用.北京:科学出版社,1999:177-178.
- [11] 赵斌,蔡庆华.地统计学分析方法在水生态系统研究中的应用.水生生物学报,2000,24(5):514-520.
- [12] 叶万辉,马克明,陈华豪.Fractal几何理论形成及应用发展.东北林业大学学报,1993,21(6):84-98.
- [13] 郭跃东,何岩.扎龙湿地水体N、P营养物质空间异质性研究.环境科学研究,2005,18(2):51-56.
- [14] 葛剑平,郭海燕.地统计学在生态学中的应用——基本理论和方法.东北林业大学学报,1995,23(2):88-94.
- [15] Lowrance R, Vellidis G, Hubbard KR. Wetlands and aquatic processes. *J Environ Qual*, 1995, 24:808-815.