

# 天山北麓地下水与自然植被的空间变异及其分形特征

苏里坦<sup>1, 2</sup>, 宋郁东<sup>1</sup>, 张展羽<sup>2</sup>

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘 要:** 对面积约 670 km<sup>2</sup> 的具有干旱气候特征的新疆三工河流域地下水埋深和自然植被盖度进行取样检测, 应用地质统计学方法对取得数据进行半方差函数分析, 计算均值、方差、标准差、变异系数等传统统计特征值, 指出用该方法表示地下水埋深和自然植被盖度引起的困惑。在此基础上, 将分形理论与地质统计学原理相结合, 计算了三工河流域地下水埋深和自然植被盖度的分形维数, 分别为 1.315 4、1.367 7; 而它们的变异系数分别为 0.537、0.368。该地区地下水埋深和自然植被盖度在空间上存在显著的变异性, 而且它们具有相似的变异特征, 即随着地下水埋深的递增(或递减), 自然植被盖度有所减少(或增加), 说明干旱区自然植被盖度对地下水埋深有很大的依赖性。这暗示着在干旱地区影响自然植被盖度的众多因素中最具有决定性的因素是地下水埋深。

**关键词:** 天山北麓; 地下水埋深; 自然植被盖度; 半方差函数; 空间变异; 分维

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

植被空间分布格局是植被群落中植被与其生境之间以及植被个体之间长期相互作用的结果, 既反映植被对环境资源的利用与适应关系, 也反映植被学特性及更新、竞争等种内种间关系。一个在大尺度上为聚集分布的植被, 在较小的尺度上可能是随机分布或均匀分布<sup>[1, 2]</sup>。因此尺度依赖性使得植被的分布格局表现为空间上的不确定性和复杂性。传统的统计学方法有时对变化不测的领域不能定量地描述其随机性和不规则性, 此时则必须用分形理论与地质统计学原理相结合进行研究。近年来, 分形理论与方法已广泛应用于自然科学和社会科学各个领域, 使得人们可以透过貌似无序、混乱、不规则的状态来揭示隐藏在背后的事物本质和规律, 为研究事物复杂性、不规则性和演化性等内在的规律性提供了全新的思路, 并为刻划尺度依赖问题提供了有力的工具。分形理论最初是 Mandelbrot<sup>[3]</sup> 提出来的, 后来 Burrough<sup>[4, 5]</sup> 将 Mandelbrot 提出的分形(Fractal)和分维(Fractal dimension)概念应用到自然生态和环境科学领域。Armstrong<sup>[6]</sup>、Tyler 和

Wheatcraft<sup>[7]</sup> 等进一步将分形理论应用到了土壤、农田等其他领域, 并取得了令人满意的成果<sup>[8]</sup>。

在干旱地区由于降水量和地面径流量稀少、蒸发量大等特征, 地下水的空间分布直接影响着自然植被群落的空间分布结构, 自然植被盖度的大小直接取决于地下水位的高低。因此非常有必要对地下水埋深和自然植被盖度的空间分布与相互作用程度进行调查。值得提出的是, 在干旱区地下水究竟在多大程度上影响自然植被盖度呢? 在不同的尺度内又怎样定量表征自然植被占据空间尺度及其变化规律? 本文采用分形理论并与地质统计学原理相结合, 就此问题开展了现场研究。目的是把三工河流域地下水埋深和自然植被盖度空间变异性的复杂程度进行量化, 对地下水埋深和自然植被盖度在不同的空间尺度上的分维的变化特征进行分析和讨论, 为干旱地区自然植被的恢复或生态环境的重建提供参考和科学依据。

收稿日期(Received date): 2004- 08- 19; 改回日期(Accepted): 2004- 11- 30。

基金项目(Foundation item): 国家重点基础研究 973 项目(G1999043506)资助。[National 973 Program for Basic Research, No. G1999043506.]

作者简介(Biography): 苏里坦(1973-), 男, 哈萨克族, 在读博士, 主要从事干旱区水资源与生态环境研究。[Su Litan(1973-), Male, Kazakh, Ph. D., Specialized in water resource and ecosystem in arid land.]

# 1 研究区概况与数据处理

## 1.1 研究区自然地理概况

研究区(图 1)位于天山北麓东段、准噶尔盆地南缘,即位于阜康县西南三工河流域处,地域为  $87^{\circ} 80' \sim 88^{\circ} 40' E$ ,  $43^{\circ} 85' \sim 44^{\circ} 15' N$ , 总面积  $670 \text{ km}^2$ , 其中撂荒地植物群落  $48.1 \text{ km}^2$ 、人工植被  $350.0 \text{ km}^2$ 、沼泽地  $3.6 \text{ km}^2$ 、草甸  $13.9 \text{ km}^2$ 、灌丛  $92.3 \text{ km}^2$ 、荒漠  $162.1 \text{ km}^2$ 。研究区地势自东南向西北缓缓倾斜,其地貌南部为山前带、中部属平原、北部大部分为沙漠。由于研究区复杂的地质构造,岩相岩性的变化,地表水发育程度的不同等,决定了不同地貌单元地下水的赋存和分布的特殊性状。其中山前带地层为元古界、古生界和中生界的变质岩系,岩石裸露,裂隙发育,各组裂隙纵横交错,彼此勾通,大气降水和冰雪融化水渗入基岩裂隙形成裂隙水。由于受地形、地貌、地质构造的控制,该区裂隙水多密集于风化裂隙带和阻水断裂带的南侧。而倾斜平原构造上为坳陷,沉积了巨厚的第四纪松散沉积物,是松散堆积层孔隙水的主要赋存富集场所。据全区钻孔揭露的地层资料分析,在揭露深度  $80 \sim 120 \text{ m}$  范围内,含水层结构在水平方向上,由南向北由山前带单一卵砾石含水层逐渐过渡为砾石、含砾中粗砂中细砂夹粉砂的含水岩组;在垂向变化上,沉积物的沉积特点具有冲洪积二元结构,即表层普遍为一层厚度

达  $10 \sim 25 \text{ m}$ , 局部  $40 \text{ m}$  的粉土,下部  $60 \sim 90 \text{ m}$ , 岩性为卵砾石、砂砾石、中粗砂等,无稳定的区域性隔水层分布,因此倾斜平原区地层赋存和埋藏着同一水力性质的孔隙潜水,其地下水埋深总趋势是由南向北由浅变深。北部沙漠区地层为风成沙,下部为砂砾及冲积中细砂、细砂、局部分布有卵砾石构成,无隔水层分布,普遍有孔隙潜水平埋藏,其地下水埋深较南部山前带深。阜康县属大陆性中温带气候,冬季时间长,春秋季节不明显,夏季酷热,昼夜温差大,年积温高,光热资源能充分满足植物生长的需要,年均降水量只有  $187 \text{ mm}$ , 而年均蒸发量为  $2064 \text{ mm}$ , 属绿洲灌溉农业区。

## 1.2 数据处理

采样地位于中国西部三工河流域处,总面积为  $670 \text{ km}^2$ 。自然植被盖度分布图来自中国科学院遥感卫星在三工河流域处(中科院新疆生态与地理研究所阜康荒漠实验站)的 MODIS 卫星数据。本文以 2003-08 的观测值作为分析对象。地下水埋深样点分析共完成了 224 个调查点(观测井),采样及测定时间选为每 10 天测 1 次,重复 3 次,取其平均值作为月平均值。各观测井的位置以地球经度和纬度来表示(见图 1)。与以往的测位法相比,用经度和纬度来表示样点坐标的好处在于我们知道样点在研究区的位置的同时,也知道样点在地球表面的位置。首先用 GPS 或经纬仪测定样点的经度值和纬度值,然后将其换算成点的坐标,进而算出其相对坐标和点距离,即经度和纬度的分布特点结合于球形和三角形的原理可直接得出地球表面任一待测点的相对坐标

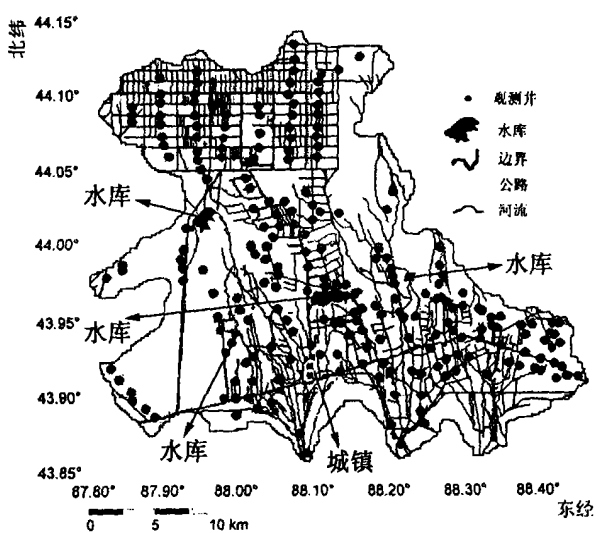


图 1 三工河流域地下水埋深观测井样点分布图

Fig. 1 Monitoring wells for groundwater depth in Sangong River Basin

$$\begin{cases} x_i = \frac{\pi R}{180}(\alpha_i - \alpha_0)(1 - \frac{\beta_i}{90^\circ}) \\ y_i = \frac{\pi R}{180}(\beta_i - \beta_0) \end{cases} \quad (1)$$

所以,地球表面研究区任一点  $Z(x)$  的坐标可写成如下形式

$$(x_i, y_i) = \left( \frac{\pi R}{180}(\alpha_i - \alpha_0)(1 - \frac{\beta_i}{90^\circ}), \frac{\pi R}{180}(\beta_i - \beta_0) \right) \quad (2)$$

式中  $\alpha_0$  为研究区参照坐标原点的经度值;  $\beta_0$  为研究区参照坐标原点的纬度值;  $\alpha_i$  为研究区第  $i$  个样点的经度值;  $\beta_i$  为研究区第  $i$  个样点的纬度值;  $x_i$ 、 $y_i$  分别为第  $i$  个样点(相对于研究区参照坐标原点而言)的横坐标和纵坐标;  $R$  为地球半径( $R \approx 6370 \text{ km}$ )。

## 2 研究方法

### 2.1 半方差函数分析

区域化变量  $Z$  是以空间点为  $x$  的三个直角坐标变量的随机场,观测前把  $Z(x)$  看作是随机场,而观测后则被看作是一个三元实值函数或空间点函数。由于随机性因素的影响,地下水埋深和自然植被盖度不仅是空间的函数,也是时间的函数。区域化变量  $Z(x)$  具有结构性和随机性的二重性<sup>[9]</sup>。在此结构性是指样本特性受区域化因素的影响程度,即指样本特性在小尺度上与空间数据具有一定相关性,而在大尺度上存在局部相关的特性,结构性又称系统性或组织性。随机性则是指样本特性受非区域化因素的影响程度,即指在细节上不可预测但具有可测定的统计属性<sup>[10-12]</sup>。地质统计学是研究空间变异最常用的方法,而变异函数是地质统计学分析的主要内容。它既能描述区域化变量的空间结构性,也能描述其随机性<sup>[13]</sup>。

地下水埋深或自然植被盖度  $Z(x)$  是取样点  $x$  的函数,同样与  $x$  点相距  $h$  点的样本记作  $Z(x+h)$ ,  $h$  为滞后距;这样可以组成位差为  $h$  的若干组数据。样本的平均值为常数,它与取样位置无关。进行半方差分析时,必须以内蕴假设(intrinsic hypothesis)为前提,即假设区域化变量  $Z(x)$  的均值稳定,方差存在且有限,该值仅和间距有关,则半方差的计算公式为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (3)$$

式中  $\gamma(h)$  是间距为  $h$  的半方差,该值随  $h$  的增加而增加;而  $N(h)$  是间距为  $h$  的计算对数。

实际上,观测点的分布是散乱的,对平稳区域化变量  $Z(x)$  先算出每个观测点与其他观测点之间的距离  $h_{is}$ ,若观测点有  $N$  个,则有  $C_N^2 = N(N-1)/2h_{is}$  个,然后把观测点间距离分成  $p$  个级别,取其可能点数据对数  $(x_i, x_{is}) = (x_i, x_i + h_{is})$ ,并算出该距离之平均距离  $h_{is}$ 、点对数  $N(h_s)$  和观测值平方和的平均值,则变异函数  $\gamma(h_s)$  变为

$$\gamma(h_{is}) = \frac{1}{2N(h_{is})} \sum_{i=1}^N [Z(x - h_s) - Z(x_i)]^2 \quad (4)$$

( $s = 1, 2, \dots, P$ )

这样就可得到组数据  $h_{is}$ 、 $N(h_s)$  和  $\gamma(h_s)$ ,由此可以画出  $\gamma(h) \sim h$  图。式中  $h_s$  为第  $s$  级空间不同点之间的样本距,又称滞后距(lag distance)。

### 2.2 分形维数的分析

分形几何的主要研究内容是分形体的维数及自相似性规律。对于分形体的自相似特征进行描述的主要工具是分形维数,它是对分形体的有效表征。概括地说,分形或分数维就是没有特征尺度的自相似结构。自然界各种现象中,如地震、水流、气候等都有这种特征<sup>[14,15]</sup>。这些现象从表面上看似乎是无序的,实际上却存在着规律性。尽管分形对象是复杂的,但仍可找到不变测度——分形维数(简称分维)。分维值( $D$ )的大小是事物复杂程度的一种量度。由于地下水埋深或自然植被盖度是一个不均匀的复合体,它与气候、水文、地形、地质等诸多因素相互作用,导致地下水和自然植被特性参数值在空间表现很不规则,呈随机性,这种情形适于用分维布朗运动或这类随机分形来量度。

用布朗运动来近似表示地下水埋深或自然植被盖度变异,则其一维半方差函数定义为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E [Z(x) - Z(x+h)]^2 = h^{2H} \quad (5)$$

式中  $Z(x)$ 、 $Z(x+h)$  分别为  $x$ 、 $x+h$  处的测定值,  $h$  为滞后距,  $H$  为幂函数。

对于布朗运动,幂指数  $H = 0.5$ ,而对地下水或自然植被特性变异,  $H$  的取值范围为  $0 \sim 1.0$ <sup>[5]</sup>。随着  $H$  的增加,地下水和自然植被特性参数值变异性逐渐减弱。这些布朗运动的分形维数由式  $D = 2 - H$  给出<sup>[5,16]</sup>。如果设  $\gamma(h)$  为测度指标,  $h$  为度量所采用的尺度指标,改变一对数据的间距,得到对应的半方差值。点绘  $\log \gamma(h)$  与  $\log h$ , 曲线中直线段  $h$  的范围称为无标度区,其中  $h$  可以是时间域或空间域的变化,也可以是实际物理量的变化。对于分形曲线,  $\log \gamma(h)$  与  $\log h$  存在着线性关系,用最小二乘法进行线性回归,得到回归直线的斜率  $m$ 。因此,分形维数  $D$  可用下式估算

$$D = 2 - \frac{1}{2} m \quad (6)$$

分维值  $D$  表征样本之间的结构性。  $D$  值越小,表示样本之间地下水和自然植被特性参数值的差异越大,即均匀性程度越差;相反,  $D$  值越大,表示样本之间地下水和自然植被特性参数值的差异越小,即均匀性程度越好。

## 3 结果与讨论

### 3.1 地下水埋深和自然植被盖度的描述性统计

表 1 是有关地下水埋深和自然植被盖度的统计特征值。其均值分别为: 2. 978 m、0. 469; 而它们的变化范围分别为: 0. 490~ 6. 780 m、0. 047~ 0. 746, 可见, 其测定值变化很大。2003 年地下水埋深和自然植被盖度的变异系数分别为: 0. 537、0. 368, 其标准差分别为: 1. 599、0. 173。表明地下水埋深的均匀性要比自然植被盖度的差一点, 表 1 中的其他统计特征值都与均值有关, 因此, 这些统计值只能在一定程度上反映样本总体。

从图 2 可以看出, 不论是地下水埋深还是自然植被盖度, 它们的变化曲线是随机的, 粗糙的。曲线的复杂程度并不随距离( $x$  方向)的变化而规律性的变化。但有一点是很明确的, 无论曲线的复杂程度如何变化, 随着地下水埋深的递增(或递减), 自然植被盖度反而有递减(或递增)的逆趋势。它们在统计意义上存在着自相似性的同时, 也存在相互相似性。因此, 可将其看作是分形曲线。

3.2 应用分形理论与地质统计学原理相结合进行分形分析

在一个连续的断面上, 若地下水埋深或自然植被盖度随距离的增加呈单调递增(或递减), 则称地下水埋深或自然植被盖度具有严格的空间依赖性, 对应的分维值  $D=1$ ; 若地下水埋深或自然植被盖度是不可预知的, 即随距离的增加, 其分布点占满整个平面(半方差~ 滞后距平面), 那么地下水埋深或自然植被盖度空间上是完全独立的, 此时其对应的分维值  $D=2$ 。大部分地下水埋深或自然植被盖度可能介于上述两种情况之间, 其对应的分维值  $D$  介于 1~ 2 间<sup>[4,5,15]</sup>。分维值  $D$  的具体计算过程见式(6)。

在地质统计学中, 半方差图集中体现了作为尺度函数的变量与尺度之间的依赖变化情况。若两相邻样本与两个远距离样本的实测值没有差别, 那么在不同尺度上的半方差  $\gamma(h)$  也就没有差别, 其半方差图将是水平的, 对应的分维值  $D=2$ , 表明该变

表 1 有关地下水埋深和自然植被盖度的统计特征值

Table 1 The statistical results of some groundwater depth and vegetation cover

样本特性	样点数	最小值	最大值	中数	均值	方差	标准差	变异系数
Sample properties	Sample number	Min	Max	Median	Mean	Variance	Std. Dev.	Coef. of Var.
地下水埋深值	224	0. 490	6. 780	2. 770	2. 978	2. 556	1. 599	0. 537
自然植被盖度	224	0. 047	0. 746	0. 486	0. 469	0. 029	0. 173	0. 368

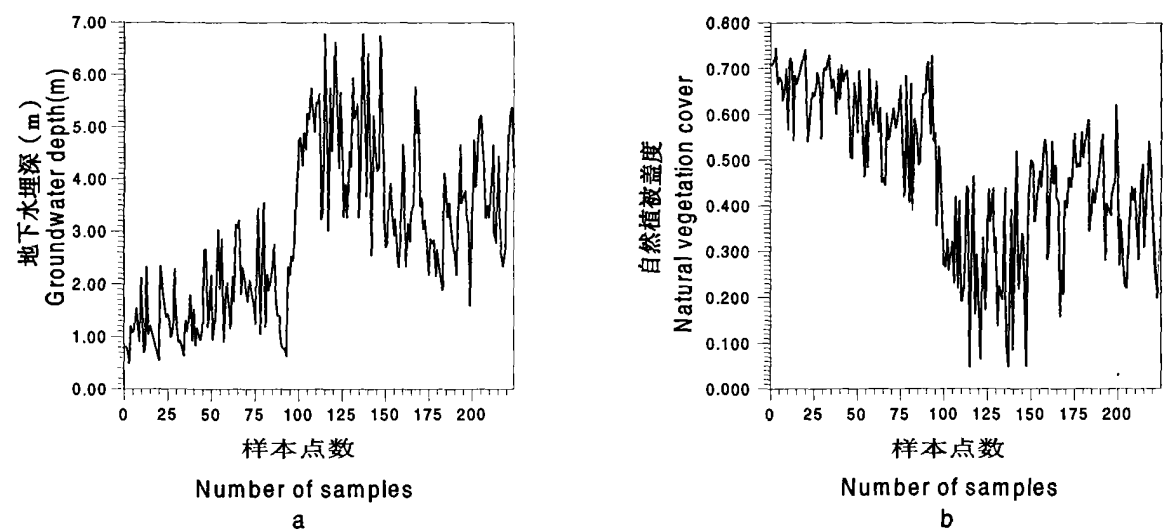


图 2 连续样方序列中样本特性实测值

Fig. 2 The measured values of some sample properties in continuous sampling series

量在连续尺度上是空间独立的;若半方差图是线性的,说明该变量具有统计自相似,即大尺度格局是小尺度格局的放大形式,分维值  $D$  不随尺度的变化而变化,可以说  $D$  是尺度的常数函数,说明变量是空间依赖的。

按式(4)可求得地下水埋深和自然植被盖度的半方差值,把一对数据的间距(滞后距)及其对应的半方差值,分别绘在双对数坐标上,所得的半方差函数如图3所示,间距  $h$  只计距离,方向是任意的。从图3可以看出在双对数坐标上,地下水埋深和自然植被盖度的半方差值与间距在一定的范围内非常接近直线关系。用最小二乘法进行线性回归,得到回归直线的斜率  $m$ ,再由式(6)可直接算出地下水埋深和自然植被盖度的分维值  $D$ (表2)。

表2 有关地下水埋深和自然植被盖度的分维值  
Table 2 The fractal dimension of some groundwater depth and natural vegetation cover

样本特性	样点数	斜率	分维值	复相关系数
Sample properties	Sample unumber	Slope	Fractal dimension	Multiple correlation coefficient
地下水埋深值	224	1.369 2	1.315 4	0.993 5
自然植被盖度	224	1.264 7	1.367 7	0.996 3

从图3可以看出,在一定的范围内,地下水埋深和自然植被盖度的半方差与间距的关系基本上为幂函数关系,符合分形规律。说明它们在各自的无标度区内,其复杂程度基本一致。求得的地下水埋深

和自然植被盖度的无标度区(也即自相似范围)分别为:0.90~3.00 km、0.80~2.95 km,即地下水埋深和自然植被盖度样地的拐点分别出现在900 m和800 m的尺度。事实上,所研究的地下水埋深和自然植被盖度的平均冠幅在800 m以上,0.80 km应是地下水埋深和自然植被盖度占据平面空间的最小尺度。因此,0~0.80 km的尺度范围应不属于空间分布所研究的尺度范围,各自的无标度区内求得的分维值分别为:1.315 4、1.367 7。从表2可见,2003年由于当地开荒多、地下水井抽水量增加、农田灌排加剧、地理地貌和地质构造分布的复杂性等原因,导致地下水埋深在空间分布的差异性要比自然植被盖度的值有所增大,即均匀性程度变差,分维值  $D$  降低,此处  $D$  值可表示地下水埋深或自然植被盖度在空间的不均匀程度。2003年地下水埋深和自然植被盖度的分维值  $D < 1.4$ ,表明地下水埋深和自然植被盖度整体上占据生态空间的程度不高,这与其恶劣的自然环境有关,它们的幂指数  $H > 0.5$ ,表明随着距离的增加,地下水埋深和自然植被盖度的半方差在其范围之内是正相关的。它们的复相关系数分别为:0.993 5、0.996 3,表明其相关性相当高。从图3可以看出,地下水埋深和自然植被盖度并不象布朗运动那样在所有标度范围内都具有自相似性的理想分形现象的介质。原因是其半方差并不总是随着间距增加而单调递增;分形规律只表现在某个范围内或呈多重分形特征,即其自相似性只在某个范围内出现,具有部分自相似性。

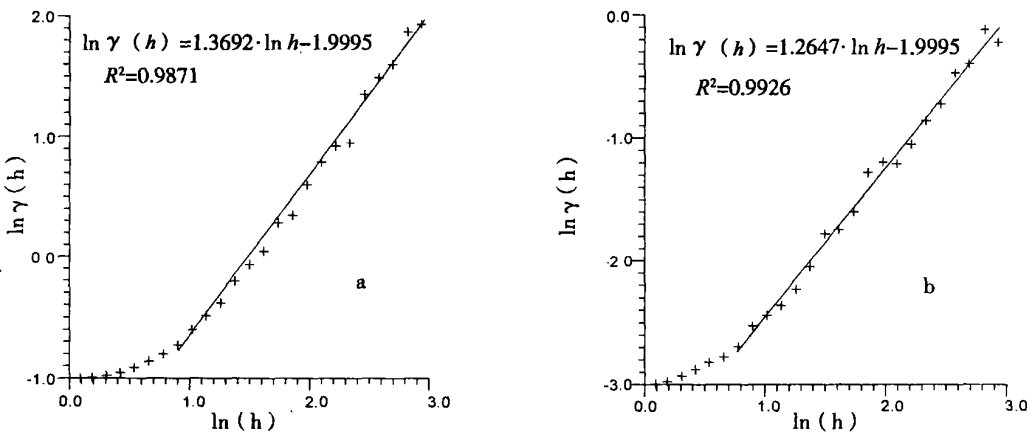


图3 三工河流域样本特性的半方差图(a. 地下水埋深值;b. 自然植被盖度值)  
Fig.3 Semi-variance graph of some sample properties in Sangong River Basin  
(a groundwater depth; b. natural vegetation cover)

图 4 是三工河流域地下水埋深和自然植被盖度在 2003 年的空间分形图。2003 年研究区地下水埋深在 0.490~ 6.780 m 间, 平均值为 2.978 m; 自然植被盖度的变化范围在 4.7%~ 74.6 % 间, 平均值为 46.9 %。通过对 2003 年样品的分析, 得出该地区地下水埋深和自然植被盖度在空间上存在显著的

变异性, 而且它们具有相似的变异特征。随着地下水埋深的增加(地下水位下降), 研究区自然植被盖度有所减少, 即地下水埋深和自然植被盖度之间存在着较好的空间相关性。换句话说, 干旱区自然植被盖度对其地下水埋深有很大的依赖性。

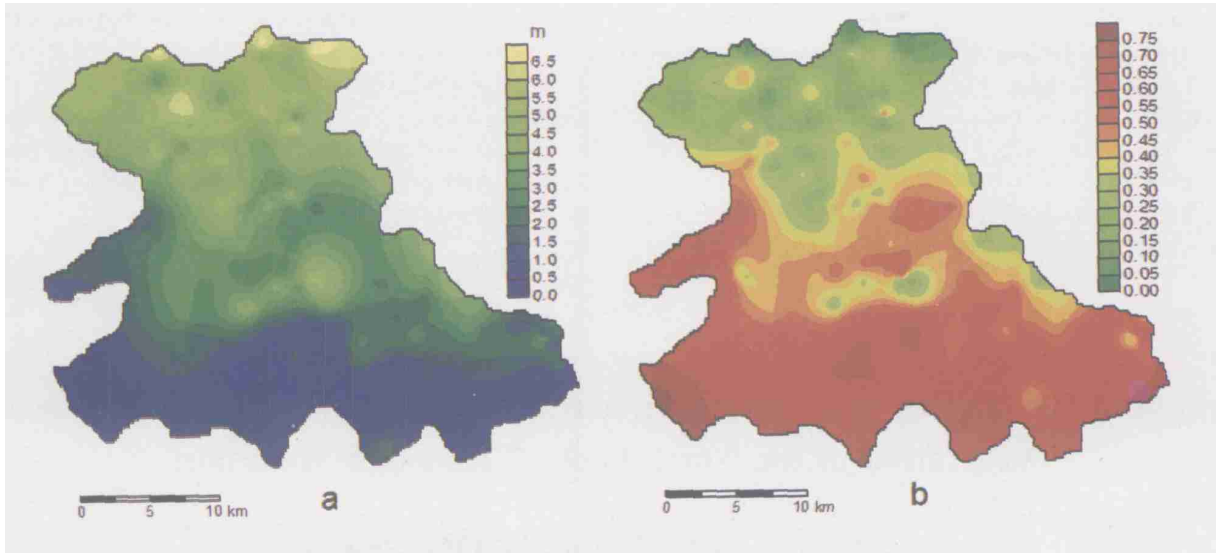


图 4 三工河流域样本特性空间分形图(a. 地下水埋深值; b. 自然植被盖度值)

Fig. 4 The spatial fractal map for sample properties in Sangong River Basin  
(a. groundwater depth; b. natural vegetation cover)

## 4 结论

通过对天山北麓东段阜康县三工河流域(南部山前带、中部属平原带和北部沙漠带)地下水埋深和自然植被盖度的空间变异和分维特征的分析, 可得出以下结论:

1. 地下水埋深和自然植被盖度并非具有理想的分形特征的介质, 其半方差并不总是随着间距增加而单调递增; 分形规律只表现在某个范围内或呈多重分形特征, 即其自相似性只在某个范围内出现。
2. 2003 年地下水埋深和自然植被盖度的复杂程度基本一致, 求得的地下水埋深和自然植被盖度的自相似范围分别为: 0.90~ 3.00 km、0.80~ 2.95 km, 各自的自相似范围内求得的分维值分别为: 1.315 4、1.367 7。
3. 分维值  $D$  值可表示样本特性在空间的不均一程度, 分维值较大, 则其分布较均匀; 分维值较小, 则说明其分布均匀性变差。通过分析得知, 研究区

地下水埋深的均匀性比自然植被盖度的要差一些。

4. 随地下水埋深的增加(地下水位下降), 研究区自然植被盖度有所减少, 自然植被盖度与地下水埋深之间存在着较好的空间相关性, 可见干旱地区地下水埋深的大小决定着自然植被盖度的大小。

## 参考文献(References):

- [1] John Harte, Ann Kinzig, Jessica Green. Self-similarity in the distribution and abundance of species [J]. *Science*, 1999, **284**(9): 334~ 336.
- [2] William E. Kunin. Extrapolating species abundance across spatial scales [J]. *Science*, 1998, **281**(4): 1513~ 1515.
- [3] Mandelbrot B. B. The Fractal geometry of nature [M]. San Francisco, Freeman. 1982.
- [4] Burrough P. A. The Fractal dimensions of landscapes and other environmental data [J]. *Nature*, 1981, **294**: 240~ 242
- [5] Burrough P. A. Multiscale sources of spatial variability in soil variation [J]. *Journal of Soil Science*, 1983, **34**: 577~ 597
- [6] Armstrong A. C. On the Fractal dimension of some transient soil properties [J]. *Journal of Soil Science*, 1986, **37**: 641~ 652
- [7] Tyler, S. W., and Wheatcraft, S. W. Application of fractal mathe-

- matrics to soil water retention estimation [J]. *Soil Sci. Soc. Am.*, 1989, **53**: 987~ 996
- [ 8 ] Li Baoguo. Application of fractal theory on soil sciences and its developments [J]. *Advance in soil science*. 1994, **22**( 1 ): 1~ 10. 李保国. 分形理论在土壤科学中的应用及其展望. 土壤学进展, 1994, **22**(1): 1~ 10
- [ 9 ] Li Habin. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, **9**( 6 ): 651~ 657.
- [ 10 ] Blöschl G, Sivapalan M. Scale issues in hydrological modeling: a review [J]. *Hydrol. Proc.*, **9**( 3-4 ): 251~ 290.
- [ 11 ] Hodgson D I F. The use of multiple linear regressions in simulating ground-water level responses [J]. *Ground Water*, 1978, 1694.
- [ 12 ] Hou Jingru. Utility geo-statistics [M]. Beijing: Geology Press, 1998. [侯景儒. 实用地质统计学 [M]. 北京: 地质出版社, 1998.]
- [ 13 ] Sun Hongquan. Geo-statistics and its application [M]. Xuzhou: Chinese Mining University Press, 1990. [孙洪泉. 地质统计学及其应用 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.]
- [ 14 ] Lin Shida, Liu Shishi. Chaotic, fractal theory and fractal dimensions [M]. Beijing: Meteorology Press, 1993. [刘式达, 刘式适. 混沌、分形和分维引论 [N]. 北京: 气象出版社, 1993.]
- [ 15 ] Xin Houwen. Chaotic, fractal theory and fractal dimensions and their application [M]. Hefei: Chinese Science and Technological University Press, 1993. [辛厚文. 混沌、分形理论及其应用 [N]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1993.]
- [ 16 ] Wang Dongsheng, Cao Lei. Chaotic, fractal theory and its application. Hefei: Chinese Science and Technological University Press [M]. 1995. [王东生, 曹磊. 混沌、分形及其应用 [N]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1995.]

## Spatial Variability and Fractal Dimensions of Groundwater and Natural Vegetation in the North Foot of Tianshan Mountain

SU Litan<sup>1, 2</sup>, SONG Yudong<sup>1</sup>, ZHANG Zhanyu<sup>2</sup>

(1. *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China;*

2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hehai University, Nanjing 210098, China)*

**Abstract:** Sampling and testing are conducted on the groundwater depth and natural vegetation cover in the 670 km<sup>2</sup> of Sangong River Basin and semi-variance function analysis is made afterwards on the data obtained by the application of geo-statistics, and the statistical properties that mean, variance, standard deviation, coefficient of variance were analyzed with both traditional and geological statistical methods. Some difficulties were met with the traditional statistical technique. Combined with fractal theory, the fractal dimensions of groundwater depth and natural vegetation cover were determined, being 1.315 4, 1.367 7, while their coefficients of variance were 0.537, 0.368 respectively in 2003. Results from studying and examining showed that the groundwater depth and natural vegetation cover were not a medium with theoretical fractal phenomenon, and the fractal features only existed in the range of specific space in arid land. Analyses of sampling from 2003 indicate that the groundwater depth and natural vegetation cover vary spatially in this area, and they showed similar variability mutually. The natural vegetation cover is decreasing while the groundwater level is descending, this indicate that the groundwater depth is the crucial factor in the most of other factors which impact on variation of natural vegetation cover.

**Key words:** the north foot of Tianshan Mountain; groundwater depth; natural vegetation cover; semi-variance function; spatial variability; fractal dimension