doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.025

不同空间粒度下地表水体分布格局多样性研究*

任圆圆[1]　张学雷[1,2]

(1.郑州大学水利与环境学院,郑州 450001;2.郑州大学自然资源与生态环境研究所,郑州 450001)

摘要:选取河南省北部、中部和南部典型研究样区,将空间粒度方法引入并应用于地表水体多样性的研究中。在总结前人研究水体多样性测度方法的基础上,提出新的方法——空间分布长度指数(MSHDLI),并在 1 km × 1 km 网格尺度下研究 MSHDLI、水网密度(RD)和空间分布面积指数(MSHDAI)的粒度效应、相关性和相关系数的粒度响应、尺度效应关系及回归模型。结果表明:随着粒度的增加,MSHDLI、RD 和 MSHDAI 的粒度响应曲线均为下降型;MSHDLI 与 RD 和 MSHDAI 有显著的相关关系,平均相关系数 $\bar{r}$ 分别为 0.997 和 0.878($P<0.01$),且 MSHDLI 与 RD、MSHDAI 相关系数的粒度效应属于显著正相关关系;MSHDLI 与 RD 的拟合度函数均是对数函数,MSHDLI 与 MSHDAI 的拟合度函数均是多项式函数;由三者的多元线性回归模型可知 MSHDLI 与 RD、MSHDAI 线性相关且对它们的解释程度达到 95% 以上。MSHDLI 可以将 RD 描述水资源广度和 MSHDAI 描述水资源空间分布离散性的优势结合起来。

关键词:地表水体　粒度　空间分布长度指数　关联性分析　尺度效应关系　回归模型

中图分类号:K928.4;P344　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2015)04-0168-08

Distribution Patterns of Surface Water Body Diversity at Different Grain Sizes

Ren Yuanyuan[1]　Zhang Xuelei[1,2]

(1. *School of Water Conservancy and Environment*, *Zhengzhou University*, *Zhengzhou* 450001, *China*

2. *Institute of Natural Resources and Eco-environment*, *Zhengzhou University*, *Zhengzhou* 450001, *China*)

Abstract: Three case study areas from north, central and south Henan Province in China were selected for applying spatial grain size method to the research of distribution patterns of surface water body diversity. On the basis of summarizing and adapting the previous research methods of surface water body diversity from related references, a new method of space distribution length index (MSHDLI) was put forward. Then all the selected information was further processed to present the effects of different grain sizes, correlativity and effects of grain size between the correlation coefficient of MSHDLI, water network density (RD) and MSHDAI (modified Shannon diversity area index), and scaling relations between the three used indices and parameter, and multiple regression analysis model at a resolution of 1 km × 1 km. Results showed that with the increase of spatial grain size, the granularity of the response curves of MSHDLI, RD and MSHDAI belonged to drop type; MSHDLI maintained significant correlativity with RD and MSHDAI with average correlation coefficient of 0.997 和 0.878 ($P<0.01$), respectively. Effect of grain size of correlation coefficient was significantly positive correlation between MSHDLI, RD and MSHDAI. The fitting function of MSHDLI and RD was logarithmic function, MSHDLI and MSHDAI was polynomial function. Multivariate linear regression model of MSHDLI, RD and MSHDAI indices was also conducted to show that MSHDLI was the dependent variable and RD, MSHDAI were the independent variables. The fitting model showed that MSHDLI and RD, MSHDAI had linear correlationship, and the

收稿日期:2014-07-01　修回日期:2014-08-29

*国家自然科学基金资助项目(41171177)

作者简介:任圆圆,博士生,主要从事水土资源多样性研究,E-mail:ayuan6710@163.com

通讯作者:张学雷,教授,博士生导师,主要从事水土资源的演变及其生态环境效应分析研究,E-mail:zxlzzu@zzu.edu.cn

level of MSHDLI to explain the others was above 95%. To a certain extent, MSHDLI can be a good combination of the indexes of RD and MSHDAI to describe the breadth and the spatial discreteness in surface water resource distributions.

Key words: Surface water body　Grain size　MSHDLI　Correlativity analysis　Scaling relations　Regression model

引言

水资源作为自然环境中的要素之一，在维系人类生存和社会发展中起着不可或缺的作用，对水资源进行研究可以在一定程度上了解其对流域内社会经济发展的支撑能力[1]。地表水资源在世界各地的分布在时间和空间上都有一定程度的差异性和不均衡性，且近年来水资源紧缺与浪费并存、水环境的破坏和旱涝灾害等问题已经受到了国家和社会的高度关注[2]。因此，对地表水体空间分布格局的研究具有十分重要的意义。

在景观生态学中粒度效应是尺度研究的重点[3-4]，土壤多样性和水体多样性研究也将尺度问题纳入了研究范围。Caniego 等[5-6]在全球尺度上运用多维分形方法分析土壤圈结构的尺度非变异性。段金龙等[7-8]研究了 5 km×5 km、3.5 km×3.5 km 和 2 km×2 km 网格尺度下土壤和土地利用多样性的关系，同时也研究了中国中东部典型样区在 2 km×2 km 网格尺度下土壤和水体多样性的关系。朱明等[9]和郭冠华等[10]分别研究了粒度变化对城市景观格局和城市热岛空间格局的影响。付颖等[11]和陈定贵等[12]分别研究了北京市近百年来和长春城市发展过程中地表水体时空变化特征。但是，将空间粒度方法应用到水体多样性研究中还非常少见，有鉴于此，本文尝试在不同空间粒度下分析和探讨地表水体分布格局的多样性特征。

水网密度[13-14]常用来衡量一定区域地表水体的丰富度，但很难描述水体空间分布的差异性。近年来，国内学者引进改进的仙农熵指数并运用遥感和地理信息技术来研究地表水体空间分布的离散性[8,15-19]，该指数含义的表征和计算与网格尺度大小密切相关，选择合适的网格尺度很难有一个统一的标准。本文在总结前人研究水体多样性方法的基础上，将空间分布面积指数作部分改进，选取河南省北部、中部和南部的典型样区作为研究区，探索 3 种研究方法得出的水体多样性值对采样粒度的响应、相关性、拟合度及模型分析，以期为水体多样性研究提供一个新的研究角度，为区域水资源持续、合理的发展提供数据支持与决策基础。

1　研究区域与研究方法

1.1　研究区概况

选取河南省北部、中部、南部的部分县市为研究区域，如图 1 所示。豫北样区主要包括林县、安阳县、汤阴县和淇县，区域内主要有海河流域和卫河流域；豫中样区主要包括汝州、禹州、襄城、宝丰、郏县，区域内主要分布着淮河支流北汝河、颍河和双洎河流域；豫南样区主要包括固始县和商城县，水体主要有浉河和淮河流域、华阳湖、鲇鱼山和东方红水库等。豫北和豫中条带状的河流较多，豫南面状（湖泊和水库）和条带状的水体兼有，基本上涵盖了区域地表水体的分布形态和特点。

1.2　数据来源及处理

研究所用数据为美国地球资源卫星（Landsat 7 和 8）的 TM 和 OLI 传感器数据（表 1），获取时期分别是 2001 年和 2013 年，获取季节在 5 月和 8 月，2 个年份相差 12 年，期间地表水体分布可能有所变化，但是由于本文旨在研究不同区域不同时段的景观格局对空间采样粒度的响应特点，故而可以忽略影像的时相差异。为了便于比较，选取的 3 个研究区采用的坐标系和投影均是 WGS 坐标系和 UTM 投影，其面积大致都在 5 200 km^2左右。

数据处理软件有 ENVI 4.5，ArcGIS 10.0 和 IBM SPSS 19.0，具体步骤为：①在 ENVI 4.5 软件中运用最大似然法对研究区的遥感影像进行监督分类得到土地利用分类的栅格数据。其中，在进行监督分类时结合 Google Earth 高清图像对影像进行比照和校正。②运用 ArcGIS 10.0 对提取的水体栅格数据进行重采样并将其二值化以提取水体的河流中心线并与 1 km×1 km 网格图层叠加。③将水体栅格数据矢量化并与 1 km×1 km 网格图层叠加。④计算 3 个研究区 19 个空间粒度下水网密度（RD）、空间分布面积指数（MSHDAI）和空间分布长度指数（MSHDLI）的值并对它们的采样粒度响应程度及趋势进行研究。⑤运用 SPSS 软件的 Pearson 积矩系数求得 MSHDLI 与 RD、MSHDAI 的相关系数并进行关联分析。⑥对 MSHDLI 与 RD、MSHDAI 之间的函数关系进行拟合并进行回归模型分析。

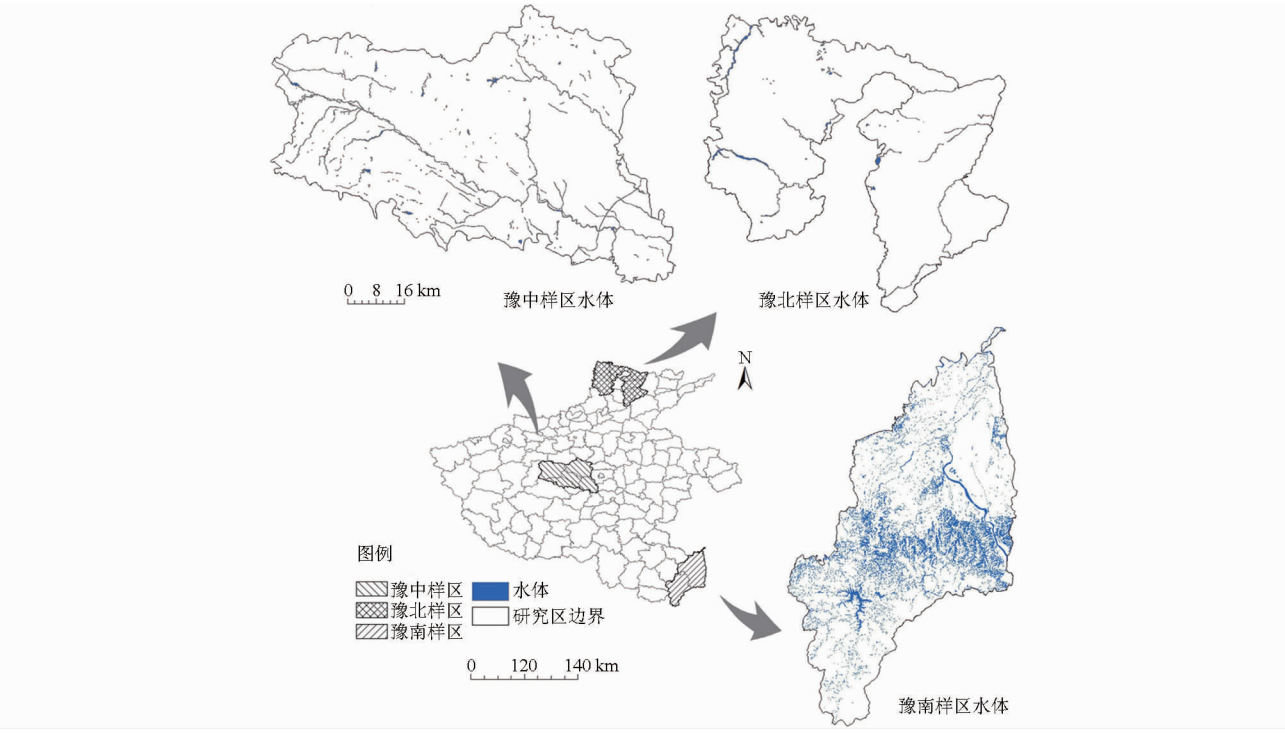

图 1 研究区地表水体分布

Fig. 1 Surface water body of case areas

表 1 遥感数据来源

Tab. 1 Source of remote sensing data

研究区	研究区具体范围	坐标系及投影	研究区面积/km²	水体面积/km²	水体比例/%	数据来源
豫北样区	林县、安阳县、汤阴县、淇县	WGS 坐标系 UTM 投影	5 305.80	57.24	1.08	Landsat 8(2013－05)
豫中样区	汝州、禹州、襄城、宝丰、郏县	WGS 坐标系 UTM 投影	5 413.39	62.23	1.15	Landsat 7(2001－05)
豫南样区	固始县、商城县	WGS 坐标系 UTM 投影	5 071.30	636.46	12.55	Landsat 8(2013－08)

1.3 研究方法

1.3.1 地表水体多样性测度方法

研究水体的测度方法主要有水网密度 RD[1,13-14]及改进的仙农熵公式 Y_h[7] 即 MSHDAI (Modified Shannon diversity area index)。其中,RD 反映单位面积内的水系长度,计算相对简单但很难描述水体空间分布的差异性;基于仙农熵的空间分布面积指数 MSHDAI 主要基于网格尺度和每个空间网格内的面积来描述地表水体空间分布的离散性。

模型是对研究实体进行必要的简化,并用适当的形式或规则把它的主要特征描述出来。本文基于 RD、MSHDAI 的特点,将地表水体景观抽象和简化为地表水网模型,从宏观角度展示地表水体的广度和空间分布状况。地表水网模型主要通过运用 ArcGIS 提取地表水体的中心线而建立,对这一模型的研究将以空间粒度为介质进行研究和探索。指数 MSHDAI 用来描述某一景观分布的离散性和多样性程度,其值主要取决于:①网格尺度。②每个空间网格内分布的景观面积。对于地表水网模型而言,在某一网格尺度下区域内的离散性用"面积"来衡量显然是不合适的。本文借鉴 MSHDAI 的公式以保证科学性[7],并考虑到地表水网模型的特点,将公式 MSHDAI 中的"面积"替换为"水网模型长度",并将这一描述地表水体空间分布格局的新的测度方法记为 MSHDLI (Modified Shannon diversity length index)。该指数在描述地表水体广度和空间分布离散性方面的适用性以及它与 RD 和 MSHDAI 之间的关系将会在下文中进行研究和探讨。

(1)水网密度(RD)

水网密度又称河网密度,是指干支流总长度与流域面积的比值,即某流域单位面积内的河流长度,用来描述水系发展与河流分布疏密的程度。在河流密度大的地区,水资源总量丰富,河流密度小的地区,水资源总量少。其计算式为

$$R_D = \frac{L}{A} \tag{1}$$

式中 R_D——水网密度

L——研究区水体总长度

A——研究区总面积

（2）空间分布面积指数（MSHDAI）

$$Y_h = \frac{-\sum_{i=1}^{S} p_i \ln p_i}{\ln S} \quad (2)$$

式中　Y_h——水体空间分布多样性

S——空间网格的数目

p_i——第 i 个空间网格里水体的面积占水体总面积的比例

多样性指数 Y_h 为在研究区内水体空间分布的多样性特征，用来描述水体分布的离散性程度和多样性格局。多样性指数 Y_h（即 MSHDAI）取值区间为[0,1]，当研究对象的相对丰度分布极度不均匀，即当一个或者少数几个对象占支配地位时，Y_h 取值趋于 0；当每个对象都均匀分布时，Y_h 取值等于 1。

（3）空间分布长度指数（MSHDLI）

$$I_L = \frac{-\sum_{i=1}^{S} L_i \ln L_i}{\ln S} \quad (3)$$

式中　I_L——地表水空间分布长度指数，取值为[0,1]

L_i——第 i 个网格里水网长度占区域水网总长度的比例

当且仅有一个网格中含有水网时，I_L 为 0；而当所有网格中均含有水网且分布较为均匀时，I_L 趋近于 1。

水网长度指研究区内水体（河流、水库和湖泊等）中心线的长度。地表水体中心线的获取步骤为：①在 ArcGIS 中，利用 Spatial analyst tools 工具中的 Reclassify 功能将水体数据集进行二值化。②在 ArcScan 工具中用 Generate feature 功能提取研究区水体的中心线。针对河流宽度较大或面状的水体（如湖泊和水库等），提取中心线失败这一情况，在编辑状态下，运用 ArcScan 功能，设置合适的环境变量 Maximum line width 与 Compression tolerance，然后再进行提取并生成地表水体河网模型。③计算模型中水网的长度。由于豫南样区的水体分布类型涵盖度较高，以该样区空间粒度为 30 m 时提取的中心线为例，即条带状河流和面状水体提取后的情况，如图 2 所示。

1.3.2　粒度推绎法

在景观生态学中，粒度是描述空间尺度的基本单位，其推绎可以分为上推和下推[20-21]。本文采用上推的方法，即将小尺度信息向大尺度信息上转化，对 10～350 m 之间的 19 个粒度进行重采样。考虑到 3 个研究样区的区域范围、影像的分辨率和水体的形态特征，同时参考生态学领域研究景观时的尺度大小[9-10]确定各个水平上的采样粒度。本文采样粒度分别有：10、15、20、25、30、35、40、50、60、80、100、120、140、160、180、200、250、300 和 350 m。随着采样粒度的增大，斑块面积会不断发生变化，零星的小斑块被逐渐融合在较大的斑块中，从而引起相关指数的变化并对景观格局产生影响。

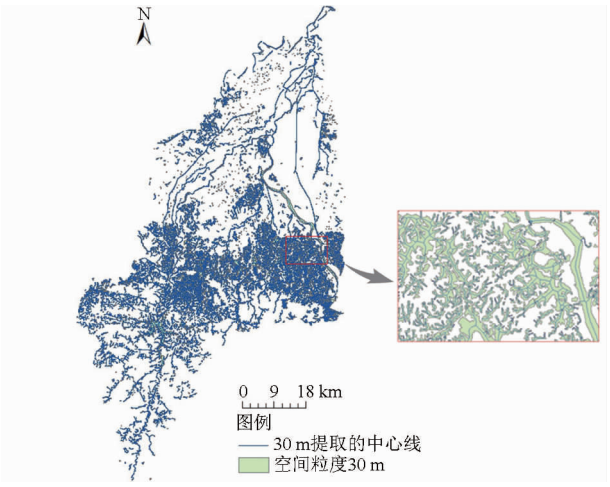

图 2　豫南样区空间粒度 30 m 时水体中心线

Fig. 2　Centerline of surface water body of 30 m grain size of southern Henan

在生态学中，景观格局随采样粒度的增加其变化一般有以下几种特征：上升型，即随着空间粒度的增大其指数值增加；下降型，即随着空间粒度的增大其指数值下降；无规律型，即随着粒度的增大其指数值呈现无规律状态；无响应型，即随着空间粒度的增大其指数值没有变化，呈直线分布[22]。本文中为了便于表达，把水体指数随空间粒度变化的曲线称为“粒度效应曲线”，水体指数随粒度变化的函数关系称为“尺度效应关系”。

1.3.3　关联关系分析

相关性分析主要研究变量之间的相关关系，并从诸多变量中判断显著和不显著变量，进行相关性分析之后，还可以用回归分析、因子分析等方法做更进一步的分析和预测[23]。最常用的相关性计算方法是 Pearson 积矩相关系数，包括双变量相关分析（Bivariate）和偏相关性分析（Partial），本文采用双变量分析。

（1）指数间相关性分析

作为有部分改进的公式，在不同的空间粒度下，对空间分布长度指数 MSHDLI 与河流密度 RD 和空间分布面积指数 MSHDAI 之间的相关关系进行研究显得十分有必要。度量 MSHDLI 与其他指数或参数的关联程度的计算式为

$$r(A,B) = \pm \max(|r_l(A,B)|, |r_{nl}(A,B)|) \quad (4)$$

式中 $r(A,B)$ 为地表水指数 MSHDLI 和其他指数或参数之间的关联系数，A、B 分别为 MSHDLI 指数、其

他指数或参数,$r(A,B)$的正负号与所取的原始值正负号保持一致。其中,$r_l(A,B)$为两者之间的线性相关系数(Pearson 积矩相关系数);$r_{nl}(A,B)$为两者的非线性相关系数,定义为

$$r_{nl}(A,B) = \pm\max(|r_l(\ln A,B)|,|r_l(A,\ln B)|,|r_l(\ln A,\ln B)|) \quad (5)$$

式中 $r_l(\ln A,B)$为 A 的自然对数与 B 之间的 Pearson 积矩相关系数,$r_l(A,\ln B)$为 A 与 B 的自然对数之间的 Pearson 积矩相关系数,$r_l(\ln A,\ln B)$为 A 的自然对数与 B 的自然对数之间的 Pearson 积矩相关系数,$r_{nl}(A,B)$的正负号与所取的原始值正负号一致。最后,分别在 $P=0.01$ 和 $P=0.05$ 下进行显著性检验。

(2)指数间相关关系的粒度效应

不同景观根据指数间的相关关系以及相关关系的粒度效应,将分析结果分为 2 大类,4 小类。第 1 大类是稳定型,即不具有明显的粒度效应,指数间的相关性随着粒度的改变没有发生质的变化,可进一步分为显著正相关不变、显著负相关不变、不存在显著相关不变 3 类;第 2 大类是不稳定型,即粒度效应明显,指数间相关性随着粒度的改变发生质变,即 2 个指数随着粒度的变化从不相关变成显著相关或是从显著相关变成不相关[22]。

2 结果与分析

2.1 研究区各指数值的粒度响应

研究土地利用分类体系中河流、水库、坑塘、湖泊和部分沟渠等地表水体,并在 1 km×1 km 网格尺度下计算 19 个空间粒度下的指数和参数值。如图 3 所示,研究区参数和指数的变化曲线主要呈现一种类型:RD、MSHDLI、MSHDAI 均为递减趋势,且 MSHDAI 的递减速率明显小于前 2 个指标。

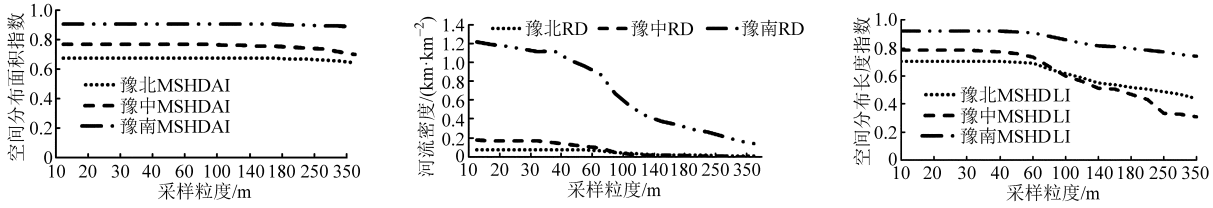

图 3 各指数和参数在 3 个研究区的粒度效应曲线

Fig. 3 Effect curves of different grain sizes in study areas

就单一指数和参数的特征值来看,主要有以下特征:

(1)随着空间粒度的增加,研究区 MSHDAI 指数粒度效应曲线,变化趋势相对比较稳定,在粒度值为 200 m 处开始出现极其缓慢的下降。这是由于在 1 km×1 km 网格尺度下,随着粒度值的增大,同一空间位置下地表水体的面积值有所减小。研究区 MSHDAI 指数值表现为:豫南样区 MSHDAI > 豫中样区 MSHDAI > 豫北样区 MSHDAI,这是由于在相同的网格尺度下,豫南样区的地表水体面积最大,豫北样区的最小。MSHDAI 的平均变化速度,豫北样区为 -0.000 5/dam、豫中样区为 -0.001 2/dam、豫南样区为 -0.000 4/dam。

(2)随着空间粒度增大,研究区 RD 参数值变化幅度为:豫南样区 RD > 豫中样区 RD > 豫北样区 RD,与图 1 和图 3 一致,豫南样区的水体面积和密度最大,豫北样区最小,随着粒度增加 3 个样区变化的可能性大小和该参数的粒度效应曲线在一定程度上保持一致;3 条粒度效应曲线在粒度为 10 ~ 120 m 之间时下降趋势明显,在 120 ~ 350 m 之间时变化趋势很平缓。这说明随着粒度的增加地表水网模型的长度被融合的速度有所下降。

(3)随着空间粒度的增加,研究区 MSHDLI 指数的粒度效应曲线变化趋势在 3 个样区总体呈下降趋势,这说明 3 个研究区地表水网的长度随着粒度增加其减小幅度相对一致;就下降速度而言,豫南样区的平均下降速度最大,其值为 -0.005 0/dam,其次分别为豫北样区和豫中样区,值分别为 -0.006 8/dam和 -0.013 4/dam。这是由于随着粒度的增加,平均变化速度和水网模型的总长度在一定程度上具有一定的关联。

将图 3 中的粒度响应曲线进行纵向比较,即对豫北样区的 MSHDLI、RD 和 MSHDAI 的粒度效应曲线在同一坐标系下进行对比研究,豫中和豫南样区同上。就 MSHDLI 与其他指数相比较而言:

每个研究区中, MSHDLI 与 RD 和 MSHDAI 的粒度响应曲线均有一定程度的同步下降关系,尤其是 MSHDLI 与 RD,这说明两者之间的相关性较强。纵向分析每个研究区的 3 个指数和参数,随着粒度增大其曲线主要有以下的变化:①指数和参数值有规律的下降并有明显的尺度转折点。②指数和参数值缓慢的下降,尺度转折点不明显。其中,表现为第一种趋势的是 MSHDLI 和 RD,尺度转折点在 60 m 和 80 m。这是由于其计算均与水体中心线的长度和其在网格内的分布情况有关,呈下降趋势说明当采样粒度增加到一定程度时一定面积的小图斑会越

来越多地被大图斑融合。尺度转折点的存在说明地表水体的特征会在该转折点发生较大的变化，同时不同研究区、不同方法计算得出的指数转折点也不同。此外，尺度转折点可能是一个数值或一个小的数值区间。表现为第二种趋势的是 MSHDAI，它的值与网格内分布的水体面积和网格数有关。如单一指数和参数的特征值(1)中所述，其在粒度为 200 m 处有非明显的转折。

2.2　关联性分析

为进一步探究 MSHDLI 在描述地表水体的广度和离散性方面的适用性，运用 SPSS 19.0 的 Pearson 积矩相关系数得出 MSHDLI 与其他 2 个指数相关的线性相关系数，并代入式(4)和式(5)，得出不同空间粒度下 MSHDLI 与指数在总体上的相关系数(表 2)。由表 2 可知，3 个研究区中 MSHDLI 与 RD 的相关性最高，$\bar{r} = 0.997$，$P < 0.01$；其次是 MSHDLI 与 MSHDAI，$\bar{r} = 0.878$，$P < 0.01$。同时，由图 3 的相关分析可知指数之间的相关性越强，指数变化的曲线就越相似，且 MSHDLI 与 RD 最为相似。因此，MSHDLI 与 RD 在一定程度上具有相互替代性。

表 2　MSHDLI 与 RD、MSHDAI 的关联分析

Tab. 2　Correlation analysis between MSHDLI, RD and MSHDAI

研究区	A	B	关联系数				
			$r_l(A,B)$	$r_l(\ln A,B)$	$r_l(A,\ln B)$	$r_l(\ln A,\ln B)$	$r(A,B)$
豫北样区	MSHDLI	RD	0.967**	0.952**	0.999**	0.977**	0.999**
	MSHDLI	MSHDAI	0.841**	0.868**	0.838**	0.865**	0.868**
豫中样区	MSHDLI	RD	0.910**	0.861**	0.994**	0.990**	0.994**
	MSHDLI	MSHDAI	0.861**	0.904**	0.854**	0.898**	0.904**
豫南样区	MSHDLI	RD	0.969**	0.963**	0.998**	0.998**	0.998**
	MSHDLI	MSHDAI	0.850**	0.863**	0.849**	0.862**	0.863**

注：** 表示 $P < 0.01$。

图 4 是不同空间粒度下，MSHDLI 与 RD、MSHDAI 之间相关关系的粒度响应曲线，可以发现：MSHDLI 与 RD、MSHDAI 在研究粒度范围内存在显著的正相关关系，属于第 1 大类“稳定型”。其中，MSHDLI 与 RD 相关系数的关联曲线接近一条直线，说明其相关性非常稳定，即 MSHDLI 与 RD 的相关性较好且在研究区内没有区域差异；MSHDLI 与 MSHDAI 的粒度效应曲线虽然稍有波动，但其相关性并未发生本质性的变化，也具有一定的稳定性。

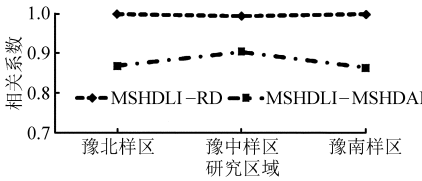

图 4　地表水体指数或参数间相关系数在不同粒度下的关联曲线

Fig. 4　Correlative analysis of indices or parameter of correlation coefficient for surface water

2.3　指数间的尺度效应关系和回归模型分析

指数间的尺度推绎关系都不是单一的，各种指数的尺度效应关系与研究区景观的特征有关[23]。3 个研究区的尺度效应关系主要有：自然对数函数和多项式函数。如图 5 所示，3 个研究区中 MSHDLI 与 RD 的拟合度函数均是自然对数函数，MSHDLI 与 MSHDAI 的拟合度函数均是多项式函数。在 2 种函数关系下，指数或参数间的拟合度最高，平均决定系数 R^2 分别为 0.994 2 和 0.900 1。以豫北为例：MSHDLI 与 RD 拟合度最好的函数是自然对数函数(图 5a)，MSHDLI 与 MSHDAI 拟合度最好的函数是多项式函数(图 5b)，豫北的 2 个回归方程说明 MSHDLI 与 MSHDAI、RD 之间存在一定的正相关关系并且存在一定的函数关系，豫中和豫南的尺度效应关系也是如此。考虑到 MSHDLI 与 RD、MSHDAI 的相关关系属于“稳定型”，因此，MSHDLI 也能在一定程度上替代 MSHDAI。

通过以上分析可知 MSHDLI 能在一定程度上同时代表 MSHDAI 和 RD，为进一步探究三者之间的关系，在 SPSS 19.0 中将 MSHDLI 作为因变量，MSHDAI 和 RD 作为自变量运用回归分析的直接进入法进行线性回归分析。结果表明(表 3)：MSHDLI 与 2 个因变量存在线性关系，3 个研究样区 R^2 的值都在 0.95 以上，表明该模型中 MSHDLI 可以解释 2 个因变量的程度都在 95% 以上；Sig. 值为 0.001 表明该模型显著回归，回归方程具有统计学意义；由非标准化系数 B 可以得出 3 个指标之间的回归方程，分别为：豫北样区 $y = -1.864 + 3.509x_1 + 2.477x_2$，豫中样区 $y = -2.767 + 4.308x_1 + 1.499x_2$，豫南样区 $y = -2.391 + 3.496x_1 + 0.122x_2$($y$ 指因变量 MSHDLI，x_1、x_2 分别指自变量 MSHDAI 和 RD)。

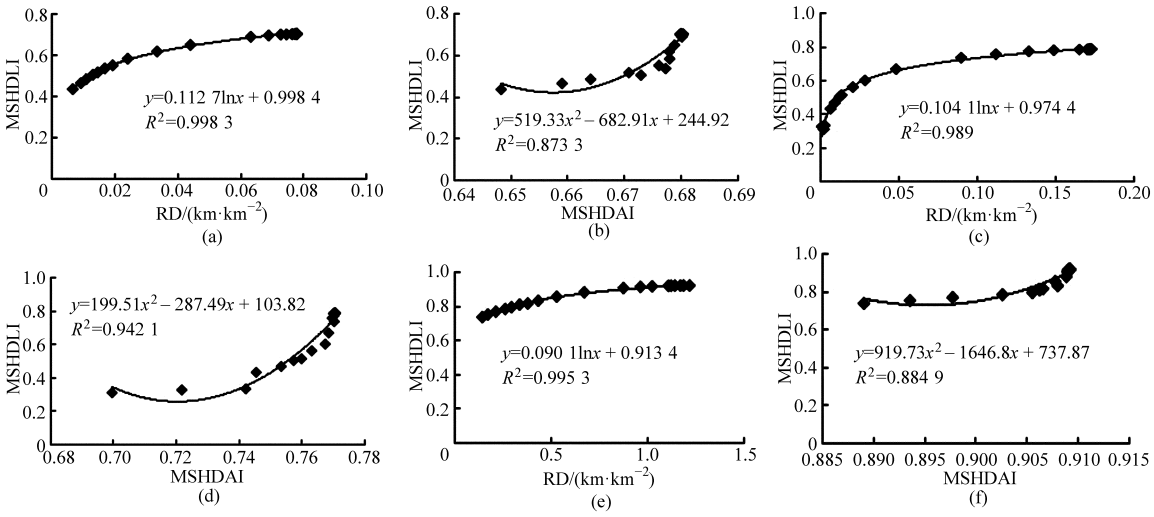

图 5 MSHDLI 分别与 RD、MSHDAI 的拟合函数分析

Fig. 5 Fitting function analysis between MSHDLI, RD and MSHDAI

(a) 豫北样区 MSHDLI 与 RD (b) 豫北样区 MSHDLI 与 MSHDAI (c) 豫中样区 MSHDLI 与 RD (d) 豫中样区 MSHDLI 与 MSHDAI (e) 豫南样区 MSHDLI 与 RD (f) 豫南样区 MSHDLI 与 MSHDAI

表 3 指数或参数多元线性回归分析结果

Tab. 3 Analysis results of indices or parameters of multivariate linear regression

模型指标	豫北样区	豫中样区	豫南样区
R^2	0.984	0.955	0.982
Sig.	0.001	0.001	0.001
B 常量	−1.864	−2.767	−2.391
B MSHDAI	3.509	4.308	3.496
B RD	2.477	1.499	0.122

注:R^2 为决定系数,表示模型对因变量的解释程度;Sig. 值表示模型得出的方程是否有统计学意义;*B* 值为分析得出非标准化系数,包含的 3 个指标分别是回归方程的常量和自变量的系数。

3 结论

(1)随着空间粒度的增加,在 1 km × 1 km 网格尺度下,MSDHLI、RD 和 MSHDAI 的粒度响应曲线均为“下降型”。

(2)MSDHLI 与 RD 和 MSHDAI 有显著的相关关系,平均相关系数分别为 0.997 和 0.878,$P < 0.01$,且指数之间的相关性越强,指数值变化的曲线就越相似,MSDHLI 的粒度响应曲线与 RD 的最为相似。因此,在描述地表水体广度方面 MSDHLI 与 RD 具有相互替代性。

(3)MSHDLI 与 RD、MSHDAI 相关系数的粒度效应属于显著正相关关系,均属于“稳定型”。MSHDLI 与 RD 相关系数的关联曲线接近一条直线,说明两者相关性较好且在研究区内没有区域差异。MSHDLI 与 MSHDAI 的粒度效应曲线虽然稍有波动,但其相关性并未发生本质性的变化,也具有一定的稳定性。

(4)MSHDLI 与 RD、MSHDAI 的尺度效应函数关系主要有 2 种:自然对数函数和多项式函数。其中在 3 个研究区中 MSHDLI 与 RD 的拟合度函数均是自然对数函数,MSHDLI 与 MSHDAI 的拟合度函数均是多项式函数,在 2 种函数关系下,指数和参数间的拟合度最高,平均决定系数分别为 0.994 2 和 0.900 1。

(5)MSHDLI 与 MSHDAI、RD 线性相关,且 3 个研究区的决定系数 R^2 大于 0.95 即 MSHDLI 对 MSHDAI、RD 的解释程度均在 95% 以上。在描述地表水空间分布离散性方面,MSDHLI 与 MSHDAI 在一定程度上具有相互替代性。综上,MSHDLI 可将 RD 描述水资源广度和 MSHDAI 描述水资源空间分布离散性的优势结合起来。

参 考 文 献

1 凌红波, 许海量, 乔木, 等. 1958—2006 年玛纳斯河流域水系结构时空演变及驱动机制分析[J]. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1129 − 1136.
Ling Hongbo, Xu Hailiang, Qiao Mu, et al. Temporal-spatial evolution of stream construction and its driving forces in Manas river basin during 1958—2006[J]. Progress in Geography, 2010, 29(9): 1129 − 1136. (in Chinese)

2 张利平, 夏军, 胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 116 − 120.
Zhang Liping, Xia Jun, Hu Zhifang. Situation and problem analysis of water resource security in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(2): 116 − 120. (in Chinese)

3 徐丽, 卞晓庆, 秦小林, 等. 空间粒度变化对合肥市景观格局指数的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1167 − 1173.
Xu Li, Bian Xiaoqing, Qin Xiaolin, et al. Effects of grain size change on landscape pattern indices of Hefei City[J]. Chinese

Journal of Applied Ecology, 2010, 21(5): 1167 – 1173. (in Chinese)
4 段金龙, 张学雷. 中国中、东部典型省会和县域土壤与土地利用多样性关联的对比研究[J]. 地理科学, 2013, 33(2): 195 – 202.
Duan Jinlong, Zhang Xuelei. Comparison of pedodiversity and land use diversity correlative analysis between typical provincial capitals and counties in east and central China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(2):195 – 202. (in Chinese)
5 Caniego J, Ibáñez J J, San José Martinez F. Selfsimilarity of pedotaxo distributions at planetary level: a multifractal approach[J]. Geoderma, 2006,134(3 – 4):306 – 317.
6 Caniego J, Ibáñez J J, San José Martinez F. Rényi dimensions and pedodiversity indices of the earth pedotaxa distribution[J]. Nonlinear Processes in Geophys, 2007, 14:547 – 555.
7 段金龙, 张学雷. 基于仙农熵的土壤多样性和土地利用多样性关联评价[J]. 土壤学报, 2011, 48(5):893 – 903.
Duan Jinlong, Zhang Xuelei. Correlative evaluation of pedodiversity and land use diversity based on Shannon entropy[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(5): 893 – 903. (in Chinese)
8 段金龙,张学雷. 中国中、东部典型样区土壤和水体多样性关联分析[J]. 水科学进展,2012, 23(5): 635 – 641.
Duan Jinlong, Zhang Xuelei. Correlative analysis of pedodiversity and spatial distribution of water body diversity at different scales in Central and East China[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(5): 635 – 641. (in Chinese)
9 朱明, 濮励杰, 李建龙. 遥感影像空间分辨率及粒度变化对城市景观格局分析的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2753 – 2763.
Zhu Ming, Pu Lijie, Li Jianlong. Effects of varied remote sensor spatial resolution and grain size on urban landscape pattern analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2753 – 2763. (in Chinese)
10 郭冠华, 陈颖彪, 魏建兵,等. 粒度变化对城市热岛空间格局分析的影响[J]. 生态学报,2012, 32(12): 3764 – 3772.
Guo Guanhua, Chen Yingbiao, Wei Jianbing, et al. Impacts of grid sizes on urban heat island pattern analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12): 3764 – 3772. (in Chinese)
11 付颖, 徐新良, 通拉嘎, 等. 近百年来北京市地表水体时空变化特征及驱动力分析[J]. 资源科学, 2014, 36(1): 75 – 83.
Fu Ying,Xu Xinliang, Tong Laga, et al. Spatial-temporal variation and driving forces of surface water in Beijing over one hundred years[J]. Resources Science, 2014, 36(1): 75 – 83. (in Chinese)
12 陈定贵, 周德民, 吕宪国. 长春城市发展过程中地表水体空间格局演变特征[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2008, 38(3): 437 – 443.
Chen Dinggui, Zhou Demin, Lü Xianguo. Spatial evolution character of surface water bodies pattern due to urbanization of Changchun city[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2008, 38(3): 437 – 443. (in Chinese)
13 袁雯, 杨凯, 吴建平. 城市化进程中平原河网地区河流结构特征及其分类方法探讨[J]. 地理科学, 2007, 27(3): 401 – 407.
Yuan Wen, Yang Kai, Wu Jianping. River structure characteristics and classification system in river network plain during the course of urbanization[J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(3): 401 – 407. (in Chinese)
14 张健枫, 伍永秋, 潘美慧, 等. 长江上游地貌特征与水系结构关系分析[J]. 资源科学, 2013, 35(3): 496 – 504.
Zhang Jianfeng, Wu Yongqiu, Pan Meihui, et al. Characteristics of stream network structure in relation to geomorphologic features in the upper stream area of Dongjiang river[J]. Resources Science, 2013, 35(3): 496 – 504. (in Chinese)
15 彭致功, 刘钰, 许迪, 等. 基于 RS 数据和 GIS 方法的冬小麦生产函数估算[J]. 农业机械学报, 2014,45(8):167 – 171.
Peng Zhigong, Liu Yu, Xu Di, et al. Estimate of regional water product function for wheat using remote sening and GIS technics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 167 – 171 (in Chinese)
16 段金龙, 张学雷. 区域地表水体、归一化植被指数与热环境多样性格局的关联分析[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2812 – 2820.
Duan Jinlong, Zhang Xuelei. Correlative analysis of the diversity patterns of regional surface water, NDVI and thermal environment[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(10): 2812 – 2820. (in Chinese)
17 段金龙, 屈永慧, 张学雷. 地表水空间分布与土壤类别多样性关联分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 110 – 116.
Duan Jinlong, Qu Yonghui, Zhang Xuelei. Correlative analysis between surface water spatial distribution diversity and pedodiversity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 110 – 116. (in Chinese)
18 齐少华, 张学雷, 段金龙. 河南省地表水时空分布特征研究[J]. 河南农业科学, 2013, 42(11): 64 – 67.
19 屈永慧, 张学雷, 段金龙. 河南省典型样区地表水分布多样性研究[J]. 人民黄河, 2014, 36(4): 47 – 49.
20 王聃同, 袁春, 张寅玲. 县域土地覆盖景观特征的粒度效应研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2013, 34(5): 35 – 41.
Wang Dantong, Yuan Chun, Zhang Yinling. Effects of spatial grain size on landscape pattern of land-cover types at county-level [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2013, 34(5): 35 – 41. (in Chinese)
21 邬建国. 景观生态学—格局过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
22 冯湘兰. 景观格局指数相关性粒度效应研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2010.
Feng Xianglan. The research on granularity effect of correlations among landscape pattern metrics—case on West Dongting Lake Region process[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2010. (in Chinese)
23 申卫军, 邬建国, 林永标, 等. 空间粒度变化对景观格局分析的影响[J]. 生态学报, 2003, 23(12):2506 – 2519.
Shen Weijun, Wu Jianguo, Lin Yongbiao, et al. Effects of changing grain size on landscape pattern analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(12): 2506 – 2519. (in Chinese)