

文章编号: 1000-2340(2015)01-0095-06

河网密度与水体空间分布多样性的对比研究

段金龙^{1,2}, 任圆圆¹, 张学雷¹

(1. 郑州大学自然资源与生态环境研究所, 河南 郑州 450001;

2. 河南工业大学信息科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 以河南省和江苏省的典型区域为例, 比较了地表水资源的分布特征评价中广泛使用的河网密度法和1种最新的基于仙农熵的水体空间分布多样性法, 计算了各研究区及其分区域内的河网密度值和1 km 网格尺度下的水体空间分布多样性, 并探索了两者之间的联系与异同。研究表明, 样区内水体表面积与河流总长度之间存在一定程度的正相关; 在评价湖泊、水库等大规模面状水体类型时, 水体多样性的表现明显优于河网密度; 当研究区面积相等时, 河网密度值与水体空间分布多样性之间的联系视研究区内地表水资源性质而定, 在湖泊稀缺地区, 两者之间一般呈明显的正相关关系, 判定系数 R^2 达到 0.5 以上, 在湖泊富集地区, 两者之间一般呈明显的负相关关系, 如苏州市达到 0.9 以上。

关键词: 多样性; 空间分布; 河网密度; 地表水资源

中图分类号: K928.4; P344

文献标志码: A

DOI:10.16445/j.cnki.1000-2340.2015.01.018

Comparative study on drainage density and water spatial distribution diversity

DUAN Jinlong^{1,2}, REN Yuanyuan¹, ZHANG Xuelei¹

(1. Institute of Natural Resources and Eco-environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Typical research areas of Henan and Jiangsu Province are selected for a correlative analysis between the traditional drainage density methodology and a new water body diversity methodology based on modified Shannon entropy. The correlative analysis is conducted to explore the difference and similarity between the above two factors after the drainage density and water body diversity in 1 km grid of each research area and subarea are calculated. The results show that there is a degree of positive relationship between the surface water area and the total river length in the research areas. The water body diversity acts better than drainage density in the evaluation of surface water with large area such as lakes and reservoirs. When the study areas are equal, the relationship between drainage density and water body diversity depends on the characteristics of surface water of each research area, for instance, there is a positive relationship between them in the lake scarce regions with the coefficient of determination (R^2) of more than 0.5 in Henan province but a negative relationship in the lake-rich regions with R^2 of more than 0.9 in Suzhou city.

Key words: diversity; spatial distribution; drainage density; surface water resources

收稿日期: 2014-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41171177)

作者简介: 段金龙(1984-), 男, 河南民权人, 讲师, 博士, 主要从事地理信息及资源遥感研究。

通信作者: 张学雷(1960-), 男, 江苏沛县人, 教授, 博士生导师。

人类活动的加剧、城市化进程的不断推进和社会经济的发展对流域内地表性质与河流水系造成了较大冲击,使得区域河流水系退化严重,水土环境持续恶化,阻碍了社会经济的可持续发展,对粮食生产也造成了直接影响。当前中国的水资源危机很大程度体现在水资源的不均衡分布上,分为空间上的不均衡分布和时间上的不均衡分布,总体上呈现出南多、北少、东多、西少、夏秋多、冬春少的分布特点。中国的水资源总量约为 $2.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 低于加拿大、巴西、俄罗斯、美国和印度尼西亚,居世界第6位,但人均水资源占有量只有 $2\ 200 \text{ m}^3$ 左右,仅为世界平均值的 $1/3$ 左右,居世界121位,为13个贫水国家之一^[1]。区域气候变化对水资源分布产生重要影响,受季风气候的影响^[2],中国的水资源空间分布总体上呈现出由东南沿海向西北内陆逐渐减少的状态,北方地区耕地多但水资源匮乏,南方地区耕地少但水资源持有量相对丰富。对水资源的空间分布特征进行综合评价在生态环境日益恶化的今天具有重要意义,同时这也是水文水资源、水土环境保护等研究领域的热点问题之一。以往研究中,水资源的供需矛盾、分布特征、不同区域水资源与经济的关系等都获得了学者的重视^[3,4],而降水量、蒸发量、水体面积、人均水资源占有量^[5]、径流量、河网密度^[6]等参数的应用,都是传统水资源空间分布特征评价中的常用手段。土壤多样性是土壤地理学研究领域的前沿性内容^[7,8],水要素是土壤发生的重要影响因素之一,涉及水土关联性的研究内容是相关学科的热点问题之一^[9]。较早的研究中^[10,11],土壤多样性的相关研究方法已被证明适用于地表水资源的分布特征评价,而水体空间分布多样性的提出也为水资源的分布特征评价提供了一种崭新的思路和方法,但其实用性、科学性仍需更多数据进行验证和支持。本研究以水体空间分布多样性研究为基础,以河网密度为参考,以中国中、东部典型样区为例,深入分析了水体空间分布多样性与传统的河网密度评价法在地表水资源分布特征评价中的异同点,并比较了两者各自的优缺点,以期为区域水土资源保护提供理论和数据支持。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

在中国中部以农业为主的经济欠发达的河南省和中国东部高度城市化的江苏省内,分别选择了不同尺度的典型样区(河南省郑州市、开封市和原

阳县,江苏省南京市、苏州市和如皋市)为例。其中河南省位于中国中部偏东,处于东经 $110^{\circ}21' \sim 116^{\circ}39'$,北纬 $31^{\circ}23' \sim 36^{\circ}22'$,地形复杂,地势西高东低,横跨黄河、淮河、海河和长江四大水系,北部为暖温带,南部为亚热带,属湿润半湿润季风气候,是国家重要的战略综合交通枢纽。江苏省位于中国大陆东部沿海中心,处于东经 $116^{\circ}18' \sim 121^{\circ}57'$,北纬 $30^{\circ}45' \sim 35^{\circ}20'$,地形以平原为主,地处长江和淮河流域下游,东临黄海,河湖众多,属温带向亚热带过渡性气候,自古便是富饶之地、鱼米之乡,人均GDP居全国各省第1位。其中郑州市和南京市均为各自省份省会及经济、政治、文化中心,开封市和苏州市均为各自省份内的代表性城市,原阳县和如皋市均为2省份内的典型县域。

1.2 数据来源及运行环境

研究所用基础遥感数据均为美国地球资源卫星(Landsat)的TM传感器数据,数据时期:郑州市、开封市和原阳县同为2004年,南京市2006年,苏州市和如皋市同为2005年,所有数据获取季节均为夏季。其他相关数据主要包括各研究区行政区划矢量数据等,研究所用遥感软件为ENVI 4.8和ArcGIS 10.1。

1.3 研究方法

1.3.1 改进的仙农熵方法 研究使用一种仙农熵的变形公式,以更好地评价地表水资源的空间分布离散性:

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

在地表水资源空间分布多样性中, S 为空间网格的数目, p_i 为第 i 个空间网格中水体的面积在水体总面积中所占的比例,这时多样性指数 Y_h 表示了研究区内地表水资源的空间分布离散性程度。多样性指数 Y_h 取值区间为 $[0, 1]$,当相对丰度分布极度不均匀,也就是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。该仙农熵变形公式涉及到空间网格概念,因此在评价对象的空间分布多样性上比经典仙农熵公式更加精确。图1展示了一个人为构造的地表水分布例子,其中 $S=9$,即网格数目为9,网格大小为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,即网格尺度为 1 km ,网格内右下角数字表示网格编号,中心数字表示该网格内地表水资源的面积,区域内地表水资源总面积为1000,代入公式(1)后求得该例子中的空间分布多样性指数 $Y_h=0.818$,即在这个 9 km^2

的研究区内,地表水资源在 1 km 网格尺度下的水体空间分布多样性为 0.818,具有较高的空间分布离散性程度。

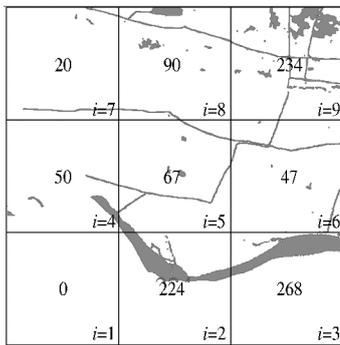


图 1 地表水空间分布例子
Fig. 1 An example of spatial distribution of surface water

$$P_i = \frac{\text{第 } i \text{ 个网格内的水体面积}}{\text{水体总面积}};$$

$$P_1 = 0/1\ 000 = 0;$$

$$P_2 = 224/1\ 000 = 0.224;$$

$$P_3 = 268/1\ 000 = 0.268;$$

.....

$$S = 9;$$

将数据代入公式(1),可以得到:

$$Y_h = 0.818$$

1.3.2 河网密度方法 河网密度又称为河流密度,指区域内干支流总长度与区域面积的比值,即区域单位面积内的河流长度,它表明了水系发展与河流分布疏密的程度,公式如下:

$$\rho = \frac{L}{A} \quad (2)$$

式中: ρ 为河网密度,单位是 $\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$; L 为区域内的河流总长度; A 为区域面积。一般情况下,河网密度大的地区,水资源总量相对丰富,反之亦然。

1.3.3 方法的对比 首先对诸研究区进行土地利用监督分类,并基于 Google Earth 高清卫星图片对分类结果进行精度验证,通过提取其中的水体信息,计算了 1 km 网格尺度下各研究区的水体空间分布多样性和河网密度值,评价了不同自然与人文条件下各研究区 2 类指数的异同点,并按照等面积分割原则将各研究区分为 8 份,评价了相似自然与人文条件下各分区域 2 类指数的异同点,以期更加准确地比较 2 类指数在水资源分布特征评价中各自的优越性和局限性。需要指出的是,尽管郑州市、南京市和苏州市均含有一定比例的山地,但它们仍均以平原地形为主,因此在各研究区河网提取中未使用传统的 DEM 提取河网法(DEM 提取法在山区表现出色,但平原表现较差),而选择通过土地利用监督分类所得结果进行河网提取,并使用 ArcScan 功能提取了栅格水体数据的中心线(根据河网密度定义和 ArcScan 实际操作要求,数据处理过程中删除了较大面积的湖泊、水库,只保留河流、少量高级别沟渠、条带状湖泊等水体类型)。

2 结果与分析

2.1 水体空间分布多样性与河网密度

图 2 依次展示了 2004 年开封市在 1 km 网格尺度下的面状地表水资源(图 2-A)、线状河网以及分区域(图 2-B)分布情况,其余研究区专题图略。研究发现,线状河网在描述低级别河流时表现较好,但在描述湖泊、高宽度河流时表现较差,而面状水体数据在地表水资源空间分布特征描述中具有更佳表现,而这在湿润地区也会体现得更加明显。如开封市北部的高宽度地表水体为黄河,但该处的线状河流无法如面状水体一样直观表达水体的面积特征。

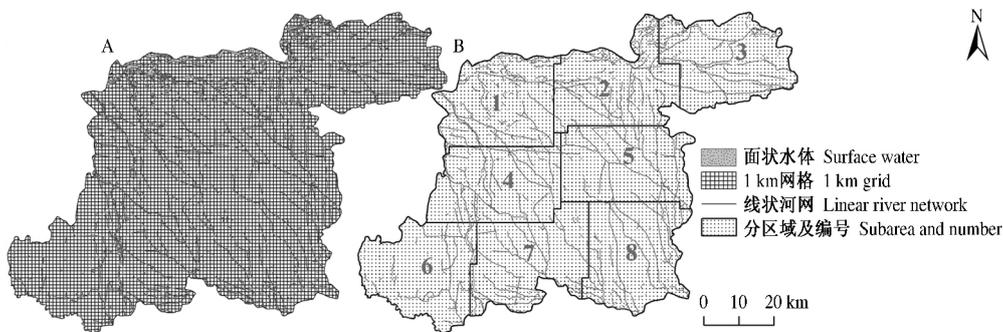


图 2 2004 年开封市河网、水体及分区域分布

Fig. 2 Distribution of drainage networks, water body and subareas of Kaifeng in 2004

6 个研究区内的河网密度、地表水资源面积、水体空间分布多样性等数据见表 1。表 1 表明,随

着样区内地表水体总面积的不断增加,样区内河流总长度具有一定程度上的递增趋势(图3-A),但经过 F 检验,发现显著性不明显($\text{Sig}(F) = 0.187$)。随

着样区内面状水体类型(湖泊、水库等)的减少,该显著性将会增强。

表1 各研究区信息统计

Table 1 Information statistics of each research area

研究市区 Case area	样区总面积/ km^2 Total area	样区内河流总长度/km Total length of river	河网密度/ $\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$ Drainage density	样区内水体总面积/ km^2 Total area of water	样区内水体比例/% Water proportion	1 km 网格个数 Grid number	水体空间分布多样性 Water spatial distribution diversity
郑州市 Zhengzhou City	7 604.79	1 566.18	0.205 947	302.16	0.039 733	7 922	0.785 097
开封市 Kaifeng City	6 281.42	2 393.87	0.381 103	237.67	0.037 837	6 595	0.855 352
原阳县 Yuanyang County	1 324.34	512.10	0.386 683	66.58	0.050 275	1 433	0.786 968
南京市 Nanjing City	6 562.59	1 524.72	0.232 335	673.18	0.102 579	6 954	0.838 235
苏州市 Suzhou City	8 463.69	2 452.72	0.289 793	2 963.89	0.350 189	8 814	0.921 714
如皋市 Rugao City	1 493.59	557.42	0.373 207	40.30	0.026 982	1 618	0.894 772

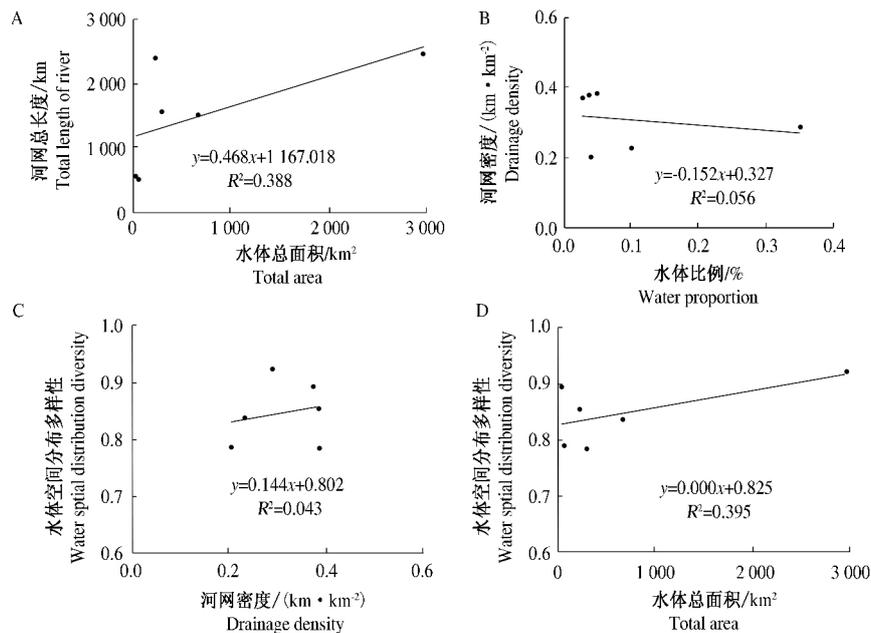


图3 水资源不同信息间的关系

Fig. 3 Relationship between different water resource information types

样区内水体比例与河网密度数据间未发现联系(图3-B),进行 F 检验,也发现两者无关联($\text{Sig}(F) = 0.652$)。造成这种现象的原因可能为线状河流不能客观表现流域水资源的总量,在河网密度研究中,为了提高评价精度,可以对线状河网进行分级赋值,并以此人为增加高宽度、大径流量河流流域的河网密度值,但此种方法需要更多实测数据和专家经验支持,同时仍无法对大规模湖泊、水库等水资源类型的分布特征进行有效评价。

样区内河网密度与水体空间分布多样性间也未发现联系(图3-C),进行 F 检验,也发现两者无关联($\text{Sig}(F) = 0.694$)。较早的研究中,已经证明在面积相等时^[11],不同研究区内的水体面积与水体空间分布多样性之间具有明显的正相关关系,即作为表征地表水资源空间分布特征的最新因子,水体空间分布多样性在很大程度上由区域水体面积所决定。本研究数据表明,水体总面积与水体空间分布多样性间存在一定程度的正相关变化关系。

(图 3-D) ,但进行 F 检验 ,发现显著性不明显 ($\text{Sig}(F) = 0.181$) 。

综上所述 ,作为评价流域内河流疏密程度的传统因子 ,河网密度在地表水资源空间分布特征评价中 ,特别是评价复杂水体类型(地表水资源由河流、湖泊、水库等多种水体类型构成)时 ,其表现明显弱于水体空间分布多样性。为更客观地比较河网密度和水体空间分布多样性之间的异同 ,下面将使用分区域评价法在相同面积条件下进行深入分析。

2.2 分区域水体空间分布多样性与河网密度

各研究区下属分区域的水体相关信息见表 2 ,从表 2 可知 ,当研究区面积相等时(本研究各样区下属分区域面积基本相等 ,误差 $< 0.5\%$) ,分区域河网密度值与分区域内水体总面积在一般情况下(样区内地表水体类型以低宽度河流、沟渠为主)呈现出不同程度的正相关关系 ,其中郑州分区的一元线性回归方程为 $y = 169.386x + 2.846$, $R^2 = 0.756$ (进行 F 检验 , $\text{Sig}(F) = 0.005$,显著相关) ,开封为 $y = 217.468x - 53.167$, $R^2 = 0.713$ (进行 F 检验 , $\text{Sig}(F) = 0.008$,显著相关) ,原阳为 $y = 37.333x - 6.119$, $R^2 = 0.630$ (进行 F 检验 , $\text{Sig}(F) = 0.019$,显著相关) ,如皋为 $y = 7.809x +$

2.103 , $R^2 = 0.338$ (进行 F 检验 , $\text{Sig}(F) = 0.130$,显著性不明显) ;而当样区内地表水体存在大规模湖泊、水库、高宽度河流时 ,分区河网密度值与分区内水体总面积将呈负相关关系 ,其中南京分区为 $y = -349.242x + 165.134$, $R^2 = 0.345$ (进行 F 检验 , $\text{Sig}(F) = 0.126$,显著性不明显) ,苏州分区为 $y = -1551.728x + 818.657$, $R^2 = 0.844$ (进行 F 检验 , $\text{Sig}(F) = 0.001$,显著相关) 。相似规律在分区域河网密度值与分区域内水体空间分布多样性之间也有体现 ,其中郑州分区的一元线性回归方程为 $y = 0.468x + 0.614$, $R^2 = 0.757$ (进行 F 检验 , $\text{Sig}(F) = 0.005$,显著相关) ,开封为 $y = 0.253x + 0.732$, $R^2 = 0.415$ (进行 F 检验 , $\text{Sig}(F) = 0.085$,显著性不明显) ,原阳为 $y = 0.310x + 0.616$, $R^2 = 0.553$ (进行 F 检验 , $\text{Sig}(F) = 0.035$,显著相关) ,南京为 $y = 0.067x + 0.784$, $R^2 = 0.026$ (进行 F 检验 , $\text{Sig}(F) = 0.703$,无关联) ,苏州为 $y = -0.300x + 0.985$, $R^2 = 0.902$ (进行 F 检验 , $\text{Sig}(F) = 0.000$,显著相关) ,如皋为 $y = 0.286x + 0.750$, $R^2 = 0.368$ (进行 F 检验 , $\text{Sig}(F) = 0.111$,显著性不明显) 。本组数据与上组数据的唯一区别是南京由上组的负相关变为本组的正相关 ,但应注意到本组南京数据的正相关判定系数 R^2 值极小。

表 2 各研究区分区域信息统计

Table 2 Information statistics of subareas in each research area

分区编号 Subarea number	分区河网密/ ($\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$) Subarea drainage density	分区水体总面积/ km^2 Total area of water in subarea	分区水体空间分布多样性 Water spatial Distribution diversity in subarea	分区编号 Subarea number	分区河网密/ ($\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$) Subarea drainage density	分区水体总面积/ km^2 Total area of water in subarea	分区水体空间分布多样性 Water spatial Distribution diversity in subarea
Z1	0.157 623	37.26	0.675 022	N1	0.189 792	47.24	0.781 184
Z2	0.227 324	49.73	0.721 109	N2	0.352 868	77.10	0.801 786
Z3	0.251 855	77.57	0.801 050	N3	0.233 663	74.66	0.780 644
Z4	0.586 827	91.84	0.855 825	N4	0.202 504	82.25	0.754 251
Z5	0.072 389	7.35	0.624 024	N5	0.274 377	48.61	0.807 040
Z6	0.062 140	14.41	0.573 770	N6	0.299 518	44.73	0.828 371
Z7	0.124 890	11.12	0.710 935	N7	0.129 931	133.30	0.790 923
Z8	0.164 378	12.54	0.722 065	N8	0.174 862	164.46	0.851 949
K1	0.482 763	58.66	0.841 504	S1	0.451 344	259.99	0.851 107
K2	0.474 409	58.13	0.843 413	S2	0.439 561	71.40	0.828 337
K3	0.361 041	29.47	0.813 158	S3	0.376 894	233.52	0.900 332
K4	0.399 292	19.55	0.830 392	S4	0.341 125	252.35	0.877 176
K5	0.338 089	15.15	0.836 665	S5	0.010 846	966.64	0.984 471
K6	0.271 258	19.25	0.769 816	S6	0.337 557	276.79	0.879 805
K7	0.345 910	20.06	0.830 980	S7	0.078 447	529.27	0.950 054
K8	0.375 189	17.23	0.863 996	S8	0.279 000	367.40	0.914 837
Y1	0.497 356	6.83	0.780 254	R1	0.294 002	3.39	0.834 789
Y2	0.216 673	2.28	0.652 225	R ²	0.448 574	5.61	0.860 901
Y3	0.304 957	2.62	0.772 014	R3	0.328 823	4.25	0.886 509
Y4	0.254 913	1.77	0.716 328	R4	0.352 553	4.58	0.830 382
Y5	0.493 251	12.60	0.757 296	R5	0.372 837	4.90	0.892 981
Y6	0.364 574	10.21	0.688 684	R6	0.399 732	4.82	0.872 518
Y7	0.415 114	15.27	0.719 009	R7	0.500 721	6.50	0.885 812
Y8	0.543 371	14.83	0.800 726	R8	0.283 284	6.05	0.791 347

注:分区编号 Z1 ~ Z8 为郑州市; K1 ~ K8 为开封市; Y1 ~ Y8 为原阳县; N1 ~ N8 为南京市; S1 ~ S8 为苏州市; R1 ~ R8 为如皋市。

Note: Subarea number Z1 ~ Z8 is Zhengzhou; K1 ~ K8 is Kaifeng; Y1 ~ Y8 is Yuanyang; N1 ~ N8 is Nanjing; S1 ~ S8 is Suzhou; R1 ~ R8 is Rugao.

综上所述,传统河网密度方法的分析计算一般将研究重点集中于流域内的所有河流,在类似于郑州市这样的湖泊、水库等大规模面状水体较匮乏地区,河网密度和水体多样性均能较好地描述区域内地表水资源的分布情况,且两者之间具有明显的正相关关系,如郑州市和原阳县的分区域 R^2 值均达到 0.5 以上;但在类似于苏州市这种大规模面状水体富集地区,河网密度无法准确描述水资源分布情况,且随着面状水体规模的不断增大,河网密度的描述准确度不断降低,而使用水体多样性评价法能够更加准确地描述地表水资源的空间分布特征,且河网密度与水体空间分布多样性之间具有明显的负相关关系,如苏州市的分区域 R^2 值达到 0.9 以上。但应注意到,水体多样性的计算依托于面状水体矢量或栅格数据的获取,土地利用分类(至少分类为水体和非水体 2 类)工作是水体多样性评价法的数据基础,而河网密度的分析与评价需要线状河网矢量数据,该数据的获取更为简单,因此在地表水资源分布特征评价中,选择河网密度还是水体多样性,首先应考虑研究区内的主要水体类型、地形等因素。

3 结论

(1) 大尺度下,区域河流总长度与区域内地表水体总面积间一般具有正相关变化趋势,小尺度下,在多湖泊、水库等区域内,河网密度值与水体总面积将呈明显的负相关变化关系,如苏州市的 R^2 值达到 0.844,且两者显著相关。

(2) 在地表水资源分布特征评价中,河网密度与水体多样性这 2 种评价因子的选择,应视研究区内的主要水体类型特征而选择不同方法,在研究数据工作量可控情况下,建议使用水体空间分布多样性因子,以获取更加准确的水体空间分布离散性评价数据。

参考文献:

[1] 宋先松,石培基,金 蓉. 中国水资源空间分布不

均引发的供需矛盾分析[J]. 干旱区研究,2005,22(2): 162-166.

- [2] 姚玉璧,张秀云,王润元,等. 洮河流域气候变化及其对水资源的影响[J]. 水土保持学报,2008,22(1): 168-173.
- [3] 张建云,贺瑞敏,齐 晶,等. 关于中国北方水资源问题的再认识[J]. 水科学进展,2013,24(3): 303-310.
- [4] 张吉辉,李 健,唐 燕. 中国水资源与经济发展要素的时空匹配分析[J]. 资源科学,2012,34(8): 1546-1555.
- [5] 崔 岩,冯 旺,马一茗. 区域水资源承载力综合评价指标体系研究[J]. 河南农业大学学报,2012,46(6): 705-709.
- [6] 师长兴,周园园,范小黎,等. 利用 DEM 进行黄河中游河网提取及河网密度空间差异分析[J]. 测绘通报,2012,10: 24-27.
- [7] IBÁÑEZ J J, DE-ALBA S, LOBO A, et al. Pedodiversity and global soil patterns at coarse scales (with discussion) [J]. Geoderma, 1998, 83: 171-192.
- [8] IBÁÑEZ, J J, KRASILNIKOV P V, SALDAÑA A. Archive and refugia of soil organisms: applying a pedodiversity framework for the conservation of biological and non-biological heritages [J]. Journal of Applied Ecology, 2012, 49: 1267-1277.
- [9] 徐学选,张北赢,白晓华. 黄土丘陵区土壤水资源与土地利用的耦合研究[J]. 水土保持学报,2007,21(3): 166-169.
- [10] 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.
- [11] 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.

(责任编辑:朱秀英)