

DOI: 10.11766/trxb201412230667

中国中、东部典型县域土壤与地表水体多样性的 粒度效应及关联性*

任圆圆 张学雷†

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

摘要 选取河南省和江苏省的6个典型县域作为研究区, 在1 km × 1 km网格尺度下采用空间粒度方法研究优势土属(DSF)和稀有土属(RSF)的土壤多样性值、3个研究时期空间分布面积指数(MSHDAI)和空间分布长度指数(MSHDLI)的粒度响应类型和4个指数间的关联性和相关关系的粒度响应及稳定性。

结果表明: 土壤DSF和RSF多样性值对空间粒度的响应基本上属于“无响应型”, 且RSF空间位置位于研究区边缘时随着粒度的增大而影响土壤多样性的稳定性; 地表水体多样性MSHDAI和MSHDLI指数对粒度的响应均属于“下降型”, 二者间及二者平均值间的尺度效应关系为多项式函数时, 拟合度最高; 2000—2013年间, 襄城县和吴江区土壤和地表水体多样性间的相关性类型为稳定型, 二者相关关系的粒度效应有显著正、负相关两种, 且相关性均未发生本质性变化, 具有一定的稳定性。林县、固始县和溧水县为不稳定型, 如皋市由于水网密度过大未表现出相关性。由此可知, 研究区的地形、水体形态和密度及人类活动干扰等是影响土壤和地表水体多样性关系的主要因素。

关键词 土壤; 地表水体; 多样性; 粒度; 关联性; 尺度效应

中图分类号 S151; K928.4; Q149 **文献标识码** A

土壤是在时间和空间上具有高度变异性的连续体, 在一定景观范围内不同时间和地点的土壤性质存在明显的差异性和多样性^[1-2]。20世纪90年代初, 土壤多样性的研究在西班牙兴起之后使得定量地描述土壤空间变异和类型丰富度成为可能^[3-10]。水分循环在土壤的形成过程中起着不可或缺的作用, 且二者关系密切, 与土壤资源的分布一样, 地表水体资源在世界各地的分布也存在不同程度的差异性和不均衡性^[11]。当前, 中国水土资源空间匹配错位, 而其在空间上的匹配程度直接影响着区域农业的可持续发展与资源的可持续利用^[12-14], 因此, 对土壤和水体资源的相关关系的研究可以为缓解这一现状提供坚实的理论支撑。

关于土壤和地表水体多样性间的关系, Ibáñez

等^[15-16]研究了流水下切和流域的等级化是如何通过时间过程导致土壤多样性的增加。Arnett和Conacher^[17]指出在地壳构造表面形成之后, 随着河流侵蚀的加剧和河网的发展, 土壤异质性和土地地貌单元的数量产生了持续的增加。近年来, 国内学者在土壤多样性的基础上引进了改进的仙农熵指数^[18]并运用遥感和地理信息系统技术来研究地表水体时空变化特征和离散性及土壤和水体资源的相关性。屈永慧等^[19]研究了在2 km × 2 km、3.5 km × 3.5 km、5 km × 5 km网格尺度下河南省5个样区地表水分布多样性的特征; 齐少华等^[20]在4个网格尺度下分析了郑州市和原阳县地表水体的时空分布特征; 段金龙等^[11, 14]探索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

* 国家自然科学基金项目(41171177)资助

† 通讯作者, E-mail: zxlzsu@zzu.edu.cn

作者简介: 任圆圆(1987—), 女, 河南襄城人, 博士研究生, 主要从事水土资源多样性的研究。E-mail: ayuan6710@163.com

收稿日期: 2014-12-23; 收到修改稿日期: 2015-06-01

性的关联分析和1km × 1km尺度下河南省典型样区地表水体空间分布和土壤类别之间多样性的关联分析等。以上研究虽已取得了明显进展,但对土壤和水体多样性的关联性主要从水体面积、空间分布多样性与土属个数和土壤构成组分多样性方面进行研究,对二者空间分布格局形成机理的相关性及稳定性鲜有探索。

在生态学中,景观指数的粒度效应指同一景观在不同粒度下景观指数的值也会不同,因此某一分辨率下的景观指数的关联分析不具有稳定性^[21-22]。本文以生态学中的粒度为介质对土壤和水体多样性的相关性进行研究,旨在解决二者在空间分布格局形成机理上的相关性、关联分析的稳定性及更小范围研究区域的适用性,这对进一步推动土壤多样性理论在我国的发展具有重要意义。本文在空间分辨率为30 m的遥感影像的基础上,对6个典型县域3个研究时期的4个指数值进行17个空间粒度的重采

样,并对其粒度响应类型、指数间相关性、相关关系粒度效应和稳定性进行研究。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河南省(处于110°21'E ~ 116°39'E、31°23'N ~ 36°22'N之间)和江苏省(处于116°18'E ~ 121°57'E、30°45'N ~ 35°20'N)分别位于中国的中部和东部,本文分别选取河南省北部、中部和南部的典型县域林州市、襄城县和固始县,以及江苏省的溧水县、如皋市(县级市)、吴江区为研究区域,具体位置见图1,相关信息见表1。江苏省的3个研究县域在经济方面优于河南省的县域,且河南省典型县域的地表水体多呈线状分布,江苏省典型县域地表水既呈线状又呈面状分布。

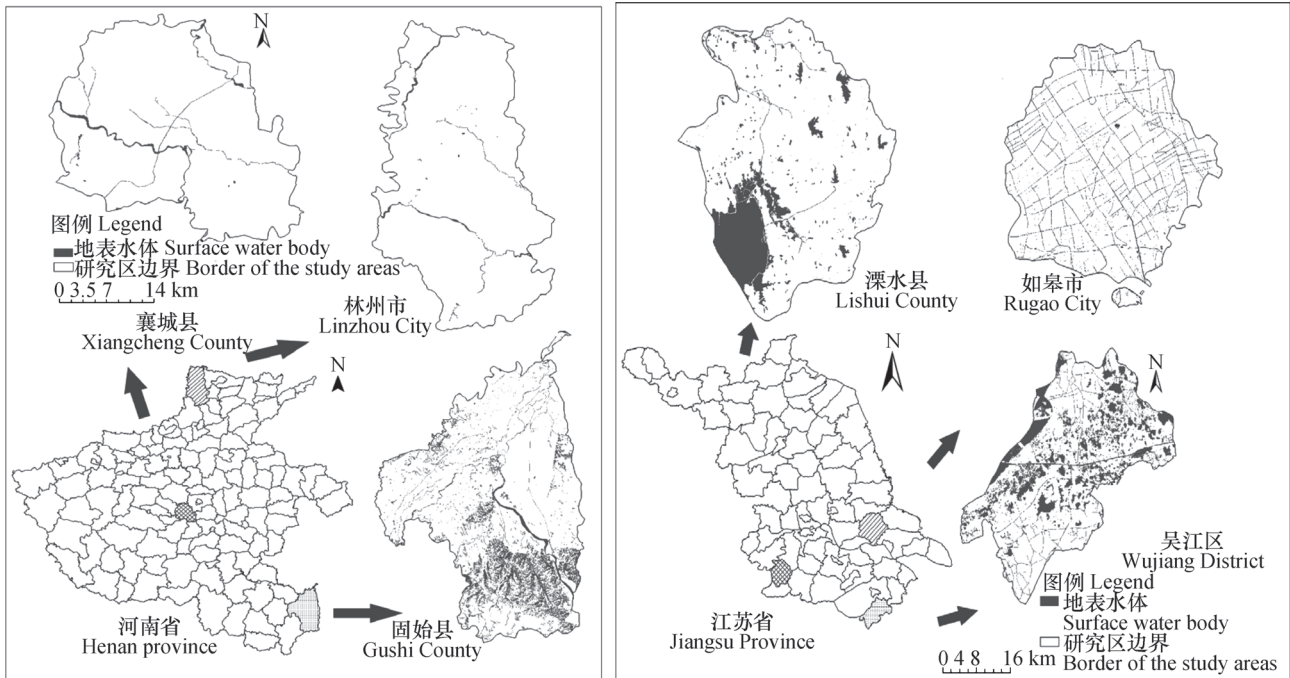


图1 研究区位置示意图及2013年地表水体分布

Fig. 1 Distribution of case study areas in Henan and Jiangsu Province

1.2 数据来源与处理

土壤数据来自全国第二次土壤普查,地表水体数据来自美国地球资源卫星Landsat7的TM数据(研究时期I和II)和Landsat8的OLI传感器数据(研究时期III),获取季节在4—8月份,旨在研究不同地区不同时期的景观格局对空间采样粒度的

响应特点,影像时相差异符合研究目的,详见表2,采用的坐标系统和投影均为WGS坐标系UTM投影。

数据处理软件有ENVI 4.5, ArcGIS10.0和IBM SPSS19.0,计算步骤为:(1)计算6个县域的土壤多样性并选出优势土属(DSF, dominant soil

表1 研究区基本概况

Table 1 The general situation of case areas

研究区 Study areas	县域面积Area (km ²)	气候Climate	地形 Terrain	水系 River system	土壤 Soil	
河南省 Henan Province	林州市 Lizhou City	2 035	暖温带大陆性季 风气候	境内多山, 山地、丘 陵占总面积的86%	浊漳河、洹河、浙 河、淇河及红旗渠	褐土、棕壤和潮土
	襄城县 Xiangcheng County	922	暖温带大陆性季 风气候	平原占总面积的 75.5%, 其余为山地 和岗丘	北汝河、颍河	褐土、潮土和砂姜黑土
	固始县 Gushi County	2 925	北亚热带向暖温 带过渡的季风性 气候	平原占47.2%丘陵占 43.6%, 山地占总面 积9.2%	淮河、史河、灌 河、泉河、石槽河	水稻土、潮土和砂姜黑土
江苏省 Jiangsu Province	溧水县 Lishui County	1 038	亚热带季风气候	丘、岗、土旁、冲犬 牙交错, 缓丘漫岗交 错, 低山丘陵占总面 积的72.5%	一、二、三千河和天 生桥河、新桥河、云 鹤支河及东平湖、中 山湖	酸性黄壤土、洪积土和 冲积土
	如皋市 Rugao City	1 493	亚热带季风气候	北东向切割成带状, 北西向切割成块, 境 内为平原	通扬运河、如海运 河、如泰运河、焦港	锥形土(潮土)和水稻 土
	吴江区 Wujiang District	1 215	北亚热带季风性 湿润气候	全境无山, 地势低 平, 南北高差2m	京杭大运河、太湖、 汾湖、九里湖等	壤土质的黄泥田、黏土 质的青紫泥和小粉土

family) 和稀有土属 (RSF, rare soil family)。(2) 运用ENVI4.5软件的最大似然法对符合研究目的、云量少的基础遥感数据进行监督分类, 并结合Google Earth卫星图片对影像进行对比和校正, 得到研究区土地利用分类栅格数据。(3) 运用ArcGIS10.0对提取的水体栅格数据进行重采样并将

其二值化以提取地表水体中心线并与1km×1km网格叠加。(4) 对优势土属、稀有土属进行重采样并与1km×1km网格叠加, 对其采样粒度响应程度及趋势进行分析。(5) 运用SPSS软件的Pearson积矩系数求取土壤和地表水体有关指数的相关性, 并对相关关系的粒度效应曲线进行研究。

表2 遥感数据获取年份及数据来源

Table 2 Date and source of remote sensing data acquired

研究区 Study areas	研究时期 I Period I	水体面积Area (km ²)	研究时期 II Period II	水体面积Area (km ²)	研究时期 III Period III	水体面积Area (km ²)	数据来源 Data source	
河南省 Henan Province	林州市 Linzhou City	2001-04-24	17.44	2007-05-19	28.66	2013-05-19	25.37	LandSat7、8
	襄城县 Xiangcheng County	2001-05-10	15.35	2007-05-19	17.23	2013-06-04	19.21	LandSat7、8
	固始县 Gushi County	2001-05-12	444.5	2007-04-19	192.0	2013-08-09	358.7	LandSat7、8
江苏省 Jiangsu Province	溧水县 Lishui County	2001年	133.2	2006年	133.9	2013-08-11	160.0	LandSat7、8
	如皋市 Rugao City	2000年	73.25	2005年	40.30	2013-04-14	70.64	LandSat7、8
	吴江区 Wujiang District	2000年	399.5	2005年	335.2	2013-04-14	283.5	LandSat7、8

1.3 研究方法

1.3.1 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^[23-24]。本文采用上推的方法即将小尺度信息向大尺度信息转化, 对5~250 m之间的17个粒度进行重采样。由于襄城县稀有土属(砂砾淋溶褐土)粒度为300 m时土壤多样性为0, 且溧水县和如皋市空间粒度为350 m时难以提取水体中心线, 故空间粒度重采样的上限为250 m。考虑到研究区的范围、影像的分辨率和水体的形态特征, 参考生态学领域研究景观的尺度大小^[25-26]确定各个水平上的采样粒度。采样粒度共17个, 分别为: 5、10、15、20、25、30、35、40、50、60、80、100、120、150、180、200和250 m。

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大; 下降型, 即随着空间粒度的增大其指数值减小; 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^[21]。在此, 将土壤和地表水体多样性指数随空间粒度变化的曲线称为“粒度效应曲线”, 各指数随粒度变化的函数关系称为“尺度效应关系”。

1.3.2 空间分布面积指数 (MSHDAI, Modified Shannon Diversity Area Index):

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

式中, S 为空间网格的数目, p_i 为第 i 个空间网格中土属或水体的面积占水体总面积的比例, 多样性指数 Y_h ^[18]为在研究区内土壤或水体空间分布的多样性特征, 用来描述土壤或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

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

式中, $r_l(\ln A, B)$ 、 $r_l(A, \ln B)$ 和 $r_l(\ln A, \ln B)$ 分别为 A 的自然对数与 B 、 A 与 B 的自然对数和 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。

指数间相关关系的粒度效应: 不同景观根据指

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。

1.3.3 空间分布长度指数 (MSHDLI, Modified Shannon Diversity Length Index):

$$I_L = \frac{-\sum_{i=1}^s L_i \ln L_i}{\ln S} \quad (2)$$

式中, I_L 为地表水体空间分布长度指数^[27], 取值为^[0, 1]; $i=1, 2, \dots, S$; S 为某网格尺度下的网格数目, L_i 为第 i 个网格中水网长度占区域水网总长度的比例。当有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。

1.3.4 关联分析法 相关性分析主要研究变量或指数间的相关关系, 进行相关分析之后, 还可以采用拟合函数分析、回归分析和因子分析等进行更加深入的分析 and 预测^[28]。本文采用Pearson积矩相关系数中的双变量分析。

指数间的相关性分析: 在不同的空间粒度下, 对研究区的优势土属(DSF)和稀有土属(RSF)空间分布多样性指数值与地表水体空间分布面积指数(MSHDAI)值和空间分布长度指数(MSHDLI)值之间的相关关系进行研究。度量这4个指数之间关联程度的计算公式为:

$$r(A, B) = \pm \max(|r_l(A, B)|, |r_{nl}(A, B)|) \quad (3)$$

式中, $r(A, B)$ 为DSF和RSF中的任意一个指数与地表水体指数MSHDAI和MAHDLI任意一个指数之间的关联系数, A 为DSF和RSF中的任意一个指数, B 为MSHDAI和MAHDLI中任意一个指数, $r(A, B)$ 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:

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个大类, 4个小类。第一大类是稳定型, 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三类; 第二大类是不稳定型, 即粒度效应明显, 指数间相关性随着粒度的改变发生了质变, 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^[21]。

2 结果与讨论

2.1 土壤多样性的特征

表3、表4分别是1km×1km网格尺度下河南省和江苏省典型县域各个土属的土壤多样性按照由大到小的排序表，表5为首位优势土属和稀有土属统计表，各县域内土壤多样性值最大、斑块面积最大

的土属选为优势土属。同时，将土壤多样性值小于0.20的定为稀有土属（考虑到土属斑块的重采样，本研究中采用首位稀有土属），林县稀有土属有3个，为堆垫褐土性土、砂砾淋溶褐土和砂砾褐土；固始县和襄城县各有2个，分别为砂姜黑土、硅质石质土和砂砾淋溶褐土、黄砂黄褐土；溧水县有4个，为卵石砂土、山沙土属、黄红土属和暗色土属；而如皋市和吴江区无稀有土属。固始县、林县、溧水县、吴江县、襄城县和如皋市的土属类别个数分别为27、24、16、16、11和7。

表3 河南省三个典型县域土壤空间分布多样性指数

Table 3 Soil spatial distribution diversity indices of the counties typical of Henan Province

土壤类型 Soil type	林州市 Linzhou City		土壤类型 Soil type	固始县Gushi County		土壤类型 Soil type	襄城县Xiangcheng County	
	面积Area (km ²)	多样性 Diversity		面积Area (km ²)	多样性 Diversity		面积Area (km ²)	多样性 Diversity
钙质石质土	715.1	0.899	黄泥田	827.3	0.892	黄砂潮褐土	262.6	0.840
砂砾褐土性土	324.1	0.819	粘盘黄褐土	410.7	0.825	覆盖灰砂姜黑土	185.9	0.784
黄砂石灰性褐土	167.9	0.728	黄土田	440.2	0.818	两合土	147.8	0.764
黄砂褐土性土	192.7	0.713	黄白泥田	241.6	0.743	脱潮两合土	153.4	0.759
黄砂褐土	146.0	0.713	灰两合土	182.4	0.716	黄砂褐土	101.8	0.723
硅质石质土	133.7	0.692	黑泥田	159.2	0.668	硅质粗骨土	30.76	0.553
钙质粗骨土	44.98	0.551	灰砂土	123.7	0.659	红褐土	18.85	0.513
钙质褐土性土	47.84	0.538	麻砂质石质土	90.70	0.615	腰砂脱潮两合土	5.350	0.327
砂砾石灰性褐土	25.37	0.503	黑土田	107.3	0.614	硅质石质土	5.619	0.322
暗矿质粗骨土	26.22	0.485	黄青泥	42.23	0.559	砂砾淋溶褐土	0.141	0.144
黄砂潮褐土	17.25	0.468	中紫土	44.28	0.555	黄砂黄褐土	0.785	0.089
钙质淋溶褐土	14.79	0.442	黑白泥田	63.65	0.549			
黄砂灰砂姜黑土	21.78	0.432	砂泥质石质土	52.29	0.546			
钙质棕壤	16.79	0.416	灰淤土	24.87	0.476			
钙质棕壤性土	9.713	0.397	黄砂黄褐土	18.98	0.447			
硅质褐土性土	12.92	0.391	红黏土	17.09	0.435			
黄砂潮土	13.20	0.387	白浆黄褐土	15.48	0.433			
砂砾潮土	6.054	0.337	钙质粗骨土	20.00	0.428			
暗矿质褐土性土	6.528	0.304	麻砂质黄棕壤	14.62	0.425			
砂泥质褐土性土	2.581	0.212	潮土田	6.526	0.306			
红黏土	2.678	0.206	漂白砂姜黑土	3.159	0.275			
堆垫褐土性土	1.972	0.195	覆盖砂姜黑土	4.500	0.273			
砂砾淋溶褐土	0.008	0.051	青黑土	4.679	0.256			
砂砾褐土	0.026	0.000	黄褐土性土	4.023	0.248			
			砂泥质黄棕壤性土	3.516	0.238			
			砂姜黑土	1.786	0.187			
			硅质石质土	0.920	0.140			

表4 江苏省三个典型县域土壤空间分布多样性指数

Table 4 Soil spatial distribution diversity indices of the three counties typical of Jiangsu Province

土壤类型 Soil type	溧水县Lishui County		土壤类型 Soil type	吴江区 Wujiang District		土壤类型 Soil type	如皋市Rugao City	
	面积Area (km ²)	多样性Diversity		面积Area (km ²)	多样性		面积Area (km ²)	多样性Diversity
板浆白土	286.9	0.856	乌栅土	660.0	0.938	高沙土	831.6	0.920
黄刚土属	138.9	0.808	白土	126.4	0.755	夹沙土	429.6	0.854
马肝土属	199.0	0.806	棕色石灰土	93.83	0.675	灰泥土	144.7	0.702
栗色土属	125.7	0.744	粉沙土	59.26	0.660	潮沙土	107.7	0.660
岗黄土属	46.24	0.656	潮泥土	65.32	0.653	泡沙土	4.085	0.300
河淤土属	55.11	0.648	沼泽土	87.66	0.651	菜园土	3.152	0.243
青泥条土	38.65	0.591	粗骨土	42.77	0.609	淤泥土	0.955	0.209
黄砂土属	27.56	0.573	棕黄土	26.89	0.533			
青泥白土	14.82	0.489	乌散土	23.18	0.508			
青泥土属	7.493	0.373	潮沙土	10.21	0.485			
紫红土	5.164	0.352	草渣土	15.53	0.470			
山红土属	1.918	0.227	乌泥土	10.35	0.443			
卵石砂土	1.515	0.181	白蛄土	8.100	0.377			
山沙土属	1.037	0.163	粉砂白土	6.097	0.364			
黄红土属	1.308	0.154	黄刚土	2.126	0.294			
暗色土属	0.671	0.081	湖成白土	3.170	0.277			

表5 研究区优势土属和稀有土属

Table 5 Dominant and rare soil families in the study areas

研究区 Case areas	土属个数 Number of soil genus	首位优势土属Soil on top of the list of DSF			首位稀有土属Soil on top of the list of RSF		
		名称 Type	面积 Area (km ²)	多样性 Diversity	名称 Type	面积 Areas (km ²)	多样性 Diversity
林州市 Linzhou City	24	钙质石质土	715.1	0.899	1.972	1.972	0.195
河南省 Henan Province	11	黄砂潮褐土	262.6	0.84	0.141	0.141	0.144
襄城县 Xiangcheng County	27	黄泥田	827.3	0.892	1.786	1.786	0.187
固始县 Gushi County	16	板浆白土	283	0.856	1.495	1.495	0.181
溧水县Lishui County	7	高沙土	816.3	0.92	无	无	无
江苏省 Jiangsu Province	16	乌栅土	647.3	0.938	无	无	无
如皋市 Rugao City							
吴江区 Wujiang District							

2.2 优势和稀有土属的粒度效应

随着空间粒度的增加，优势土属和稀有土属的粒度效应曲线如图2所示，特征：（1）随着空间粒度的增加，林县、溧水县的DSF和RSF以及如皋市、吴江区的DSF的粒度效应曲线属于“无响应型”，即指数值基本上没有变化，呈直线分布。

（2）随着空间粒度的增加，襄城县DSF的粒度效应曲线属于“无响应型”，而RSF的粒度效应曲线在空间粒度为60 m之后开始出现小幅度波动，并在200~250 m间出现下降趋势，60~250 m间的平均变化速度为 -0.0018 dam^{-1} 。（3）随着空间粒度的增加，固始县DSF的粒度效应曲线变化较为稳定，而RSF的粒度效应曲线在粒度值为200 m时出现小幅度上升趋势，速度为 0.0016 dam^{-1} 。特征（2）和

（3）中RSF曲线出现小幅度变化的情况，经研究发现与稀有土属的空间位置及重采样过程中斑块形状变化有关。襄城县和固始县的稀有土属斑块均位于研究区的边缘位置，而其他4个县域的稀有土属均位于研究区中心。襄城县稀有土属砂砾淋溶褐土位于县城东南角最边缘，在重采样过程中随着粒度的增加，土壤图斑的形状会发生变化致使部分面积超出边界（图3），ArcGIS10.0处理中保留行政边界和稀有土壤斑块的公共部分，使得土壤斑块面积发生变化进而引起相应指数的变化，固始县RSF也是如此。这说明稀有土属斑块在研究区的空间位置和重采样过程中斑块形状的变化是影响其粒度效应曲线变化的主要因素。

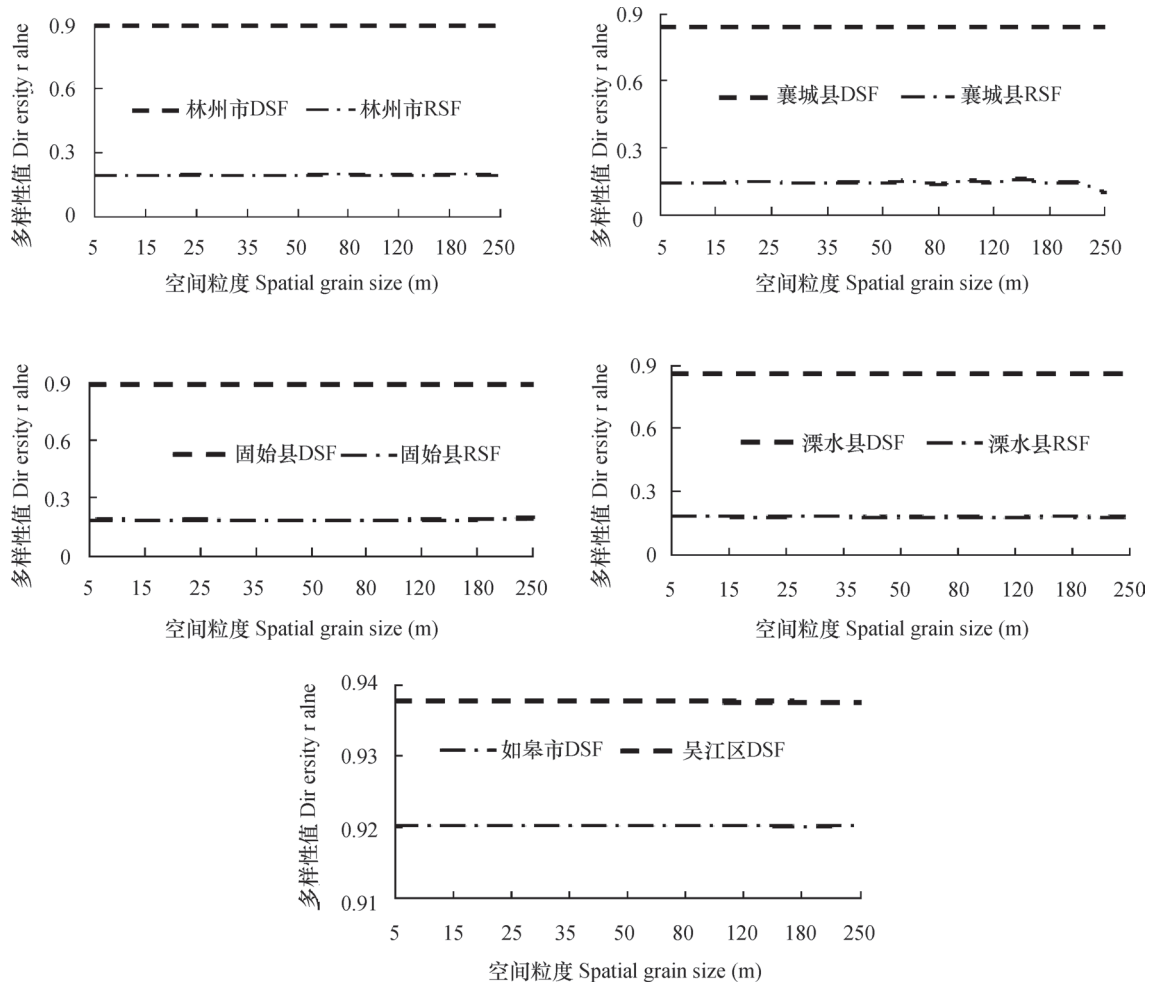


图2 研究区优势土属和稀有土属的粒度效应曲线

Fig. 2 Grain size effect curves of DSF and RSF in the study areas

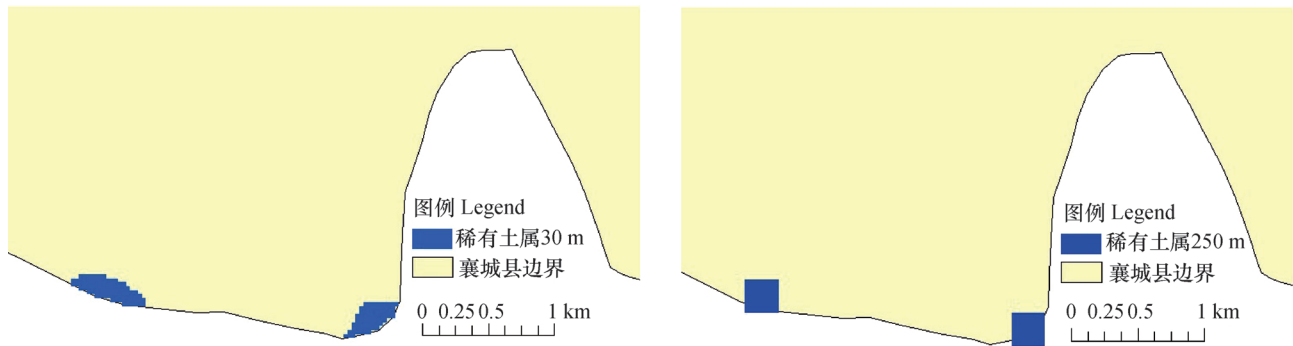


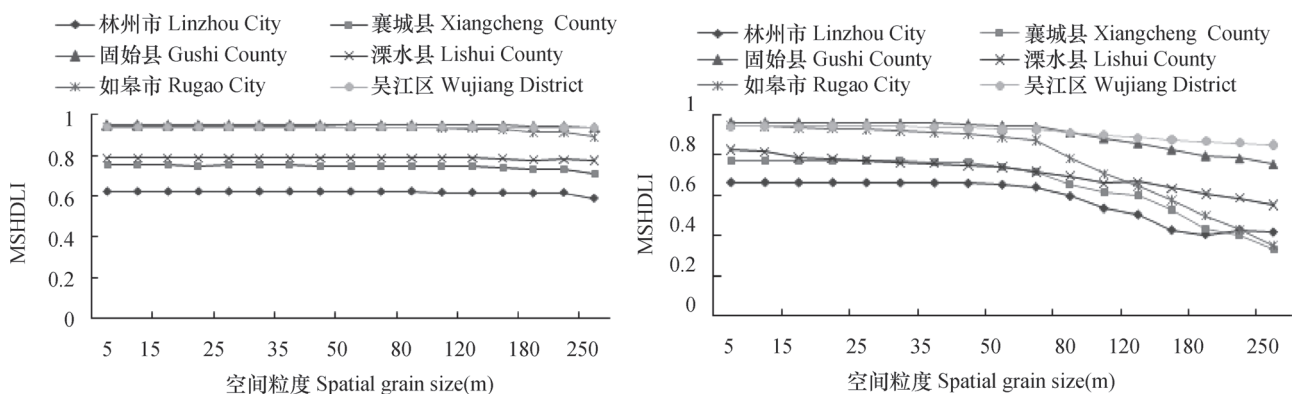
图3 空间粒度为30 m和250 m时襄城县稀有土属的图斑变化

Fig. 3 Changes in soil patches of rare soil family (RSF) with grain size varying from 30 m to 250 m in Xiangcheng County

2.3 地表水体多样性粒度响应与尺度效应的关系

2.3.1 指数间的粒度效应 在1 km × 1 km网格尺度下计算河流、水库、坑塘、湖泊和沟渠等地表水体17个空间粒度下的指数值。图4中，6个县域在研究时期 I MSHDAI和MSHDLI的变化曲线总体呈下降趋势，且MSHDAI递减速率明显小于MSHDLI，时期 II 和 III 2个指数的粒度效应曲线与时期 I 变化趋势一致。2个指数在不同空间粒度下各个县域指数的平均值由大到小的顺序也一致，具体：（1）MSHDAI的粒度效应曲线在3个研究时期内随着空间粒度的增加，其变化趋势相对比较稳定，在粒度值为200 m处出现下降趋势。这是由于在1 km × 1 km网格尺度下，同一空间位置的地表

水体面积随着空间粒度的增加有所减少。3个研究时期不同空间粒度下各县域MSHDAI的平均值从大到小依次为：吴江区（0.929）>固始县（0.918）>如皋市（0.912）>溧水县（0.794）>襄城县（0.731）>林县（0.628）。（2）MSHDLI的粒度效应曲线在3个研究时期随着空间粒度的增加，其变化趋势呈“下降型”，粒度为5~60 m间较为平稳，60~250 m间下降速度加快，这说明随着粒度的增加地表水体中心线的长度被融合的速度有所加快。3个研究时期不同空间粒度下各县域MSHDLI的平均值由大到小依次为：吴江区（0.899）>固始县（0.860）>如皋市（0.751）>溧水县（0.725）>襄城县（0.669）>林县（0.608）。



注：图表中纵坐标MSHDAI指空间分布面积指数，即Modified Shannon Diversity Area Index；MSHDLI指空间分布长度指数，即Modified Shannon Diversity Length Index

图4 地表水体指数在研究区内的粒度效应曲线（研究时期 I）

Fig. 4 Curves of grain size effect on surface water indices in the study areas (Study period I)

2.3.2 指数间的尺度效应关系 如图5，研究时期 I MSHDLI与MSHDAI在研究区的尺度效应关系均为多项式函数时拟合度最高，研究时期 II 和 III 也是如此。图中各研究区的回归方程说明MSHDLI与

MSHDAI间存在一定的正相关关系。且计算6个典型县域不同空间粒度下多样性的平均值并进行函数拟合发现：MSHDLI平均值与MSHDAI平均值间的尺度效应关系也为多项式函数时拟合度最高。这说

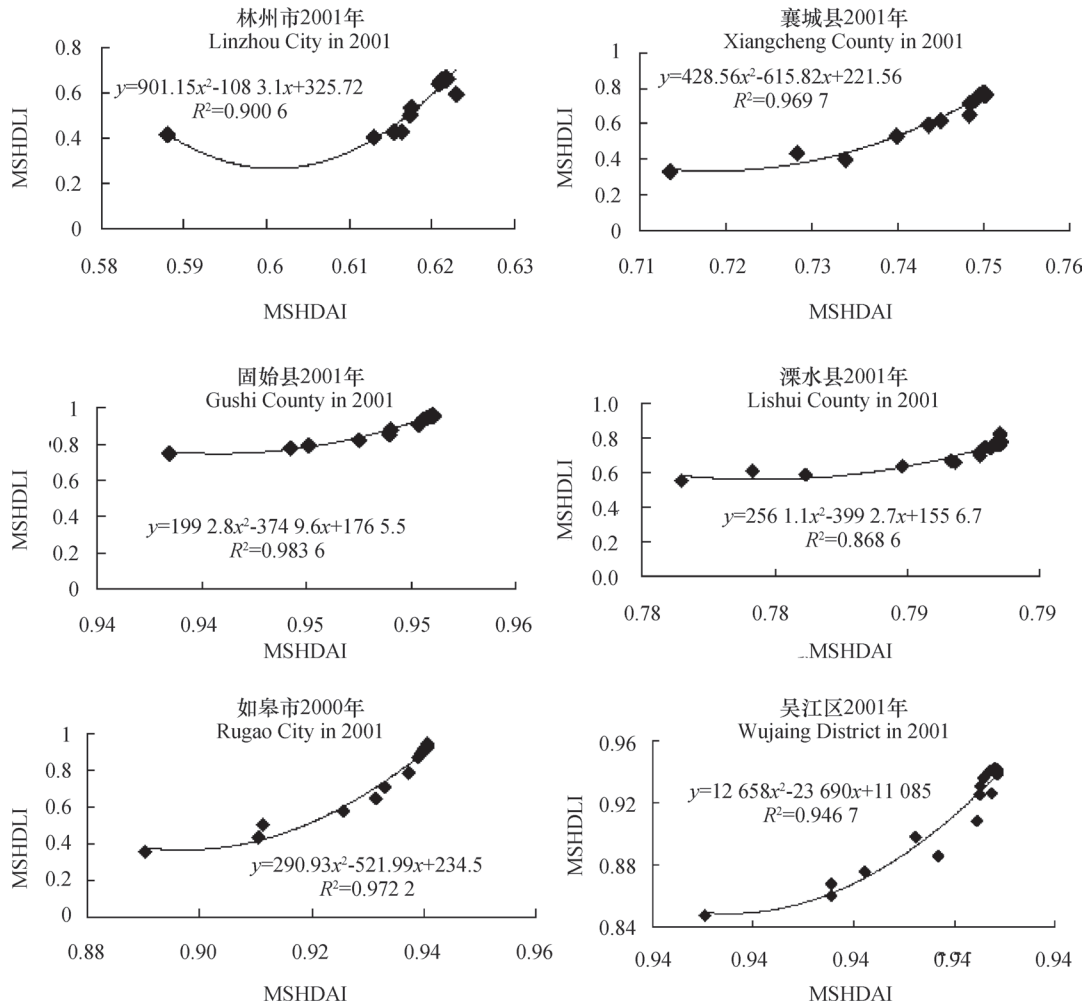


图5 空间分布长度指数 (MSHDLI) 与空间分布面积指数 (MSHDAI) 的拟合关系曲线

Fig. 5 Curves of fitted correlation between MSHDAI and MSHDLI

明随着时间的推移，水体面积和形态的改变并没有影响两个指数间的尺度效应关系。

2.4 土壤、地表水体多样性的相关性

从表6可知，4个指数在3个研究时期的相关性主要有2个大类和4个小类：

第一大类：稳定型。（1）显著正相关不变：襄城县RSF与MSHDAI；吴江区DSF与MSHDAI、DSF与MSHDLI；林县DSF与MSHDLI。（2）显著负相关不变：襄城县指数DSF与MSHDAI和指数DSF与MSHDLI；固始县RSF与MSHDAI和RSF与MSHDLI。（3）不存在显著相关不变：林县RSF与MSHDAI和RSF与MSHDLI；襄城县RSF和MSHDLI；固始县DSF与MSHDLI；溧水县RSF与MSHDAI和RSF与MSHDLI；如皋市指数DSF与MSHDAI和指数DSF与MSHDLI。对相关性稳定的县域进行分析可知，河南省襄城县和江苏省吴江区

在3个研究时期内相关性最为稳定，与二者的地形有关，这与土属类别数和地形的关系相似。襄城县和吴江区平原面积占总面积的比例均超过75%，而林县、固始县和溧水县其山地、丘陵面积占总面积比例均超过50%。如皋市境内为平原地带，但北东向切割呈带状，北西向切割成块，且河网密度高达4 km km⁻²以上，故如皋市指数间不存在相关性。

第二大类：不稳定型。随着空间粒度的增加，从不相关变成显著相关的是溧水县DSF与MSHDLI；从显著相关变成不相关的是林县DSF与MSHDAI和溧水县DSF与MSHDAI；从显著相关变成不相关又到显著相关的是固始县指数DSF与MSHDAI，可以看出指数相关性不稳定的县域山地和丘陵居多。此外，可能因人类活动干扰大而导致了土壤和地表水体多样性之间关系的不稳定。

综上所述，土壤和地表水体多样性相关

性不稳定的县域有林县、固始县和溧水县，尤其是溧水县。溧水县情况特殊，其DSF与MSHDLI、MSHDAI指数相关关系不稳定，且RSF与MSHDLI、MSHDAI指数在3个研究时期均不相关。溧水县与其他5个研究区相比，特殊之处在于溧水县西南部有一个较大的面状湖泊（石臼湖，图1）。由图6可知，空间粒度为30 m时该湖泊几乎无法提取到水体中心线，此情况在其他5个湖泊等面状水体少的县域并非如此。究其原因溧水县该湖泊的水体面积或宽度超过了一定的临界值，从而影响到水体空间分布多样性的表达。考虑到粒度效

应，粒度为100 m和250 m时提取的水体中心线更趋杂乱，进一步说明较大面积的面状水体中心线难以提取，进而使得长度指数的适用性降低，也在一定程度上影响土壤和水体多样性的相关关系。因此，在下一步研究中，考虑在自动矢量化ArcScan—矢量化设置Vectorization Settings中将最大线宽Maximun Line Width设置为最大值100（系统默认的区间为1~100），在此栅格宽度范围内以长度指数MSHDLI表达线状水体的空间分布多样性，大于此范围，则运用面积指数MSHDAI来进行多样性分析。

表6 土壤和地表水体多样性指数间的相关性分析

Table 6 Correlation analysis of diversity indices of soil and surface water body

研究区 Case study areas	指数 Index	$r(A, B)$		
		2001年 Year 2001	2007年 Year 2007	2013年 Year 2013
林州市 Linzhou City	A=DSF B=MSHDAI	0.675**	-	-
	A=DSF B=MSHDLI	0.580**	0.709**	0.765**
	A=RSF B=MSHDAI	-	-	-
	A=RSF B=MSHDLI	-	-	-
襄城县 Xiangcheng County	A=DSF B=MSHDAI	-0.793**	-0.921**	-0.672**
	A=DSF B=MSHDLI	-0.631**	-0.613**	-0.563*
	A=RSF B=MSHDAI	0.702**	0.833**	0.549*
	A=RSF B=MSHDLI	-	-	-
固始县 Gushi County	A=DSF B=MSHDAI	0.584*	-	0.661**
	A=DSF B=MSHDLI	-	-	-
	A=RSF B=MSHDAI	-0.867**	-0.819**	-0.811**
	A=RSF B=MSHDLI	-0.663**	-0.693**	-0.614**
溧水县 Lishui County	A=DSF B=MSHDAI	-0.561*	-	-
	A=DSF B=MSHDLI	-	-	-0.943*
	A=RSF B=MSHDAI	-	-	-
	A=RSF B=MSHDLI	-	-	-
如皋市 Rugao City	A=DSF B=MSHDAI	-	-	-
	A=DSF B=MSHDLI	-	-	-
吴江县 Wujiang County	A=DSF B=MSHDAI	0.853**	0.854**	0.902**
	A=DSF B=MSHDLI	0.934**	0.923**	0.927**

** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

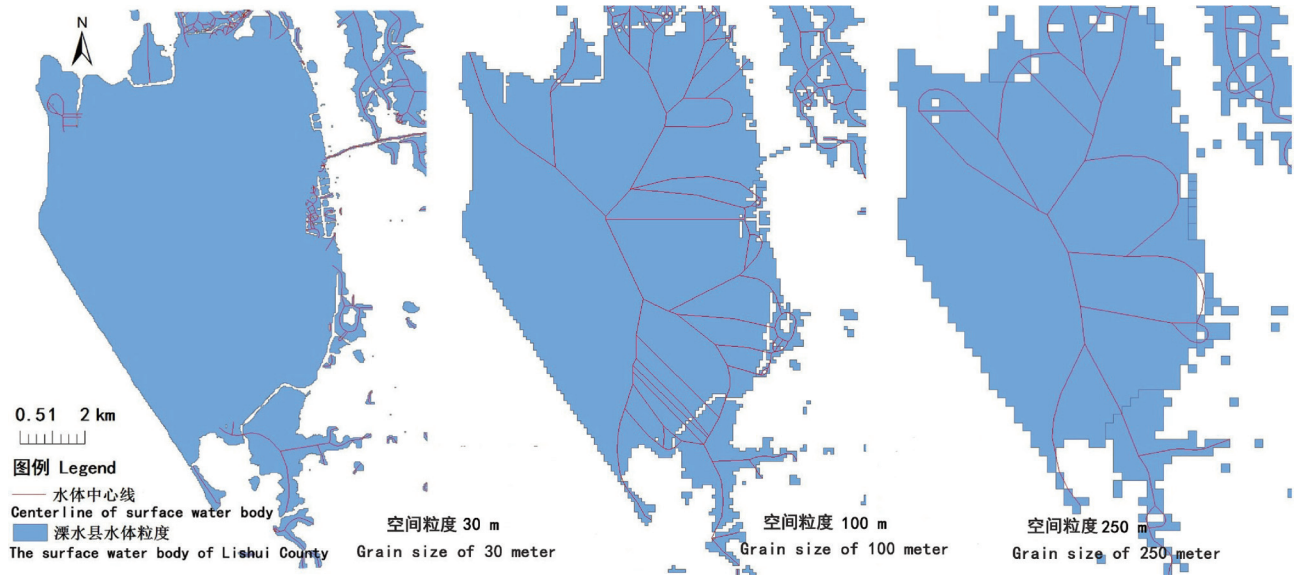


图6 溧水县石臼湖2013年空间粒度为30 m, 100 m和250 m时提取的水体中心线

Fig. 6 Centerlines of Lake Shijiu in Lishui County acquired with grain size being 30 m, 100 m and 250 m in 2013

2.5 土壤、地表水体多样性指数间相关关系的粒度效应

当前描述景观格局的指数较多但是指数之间的信息存在重复表达现象,在一定程度上不能满足其独立性质的表达,因此对指数间相关关系进一步研究就显得十分必要^[21]。土壤和地表水体资源作为自然界中重要的景观组分,对其相关性和稳定性进行研究正切合这一出发点。

图7是相关关系最为稳定的襄城县和吴江区有相关性的指数间相关系数的粒度响应曲线,襄城县在不同空间粒度下RSF与MSHDAI存在显著的正相

关关系,DSF与MSHDAI及DSF与MSHDLI均存在显著的负相关关系。其中,DSF与MSHDLI相关系数的关联曲线接近一条直线,说明其相关性稳定。DSF与MSHDAI和RSF与MSHDAI两对指数相关系数的关联曲线虽然有一定程度的波动,但其相关性并未发生本质性的变化,也具有一定的稳定性,说明襄城县土壤和地表水体间的相关性较好。吴江区DSF与MSHDAI和DSF与MSHDLI相关系数在研究粒度范围内均存在显著的正相关关系,且相关性稳定。

襄城县 Xiangcheng County 吴江区 Wujiang District

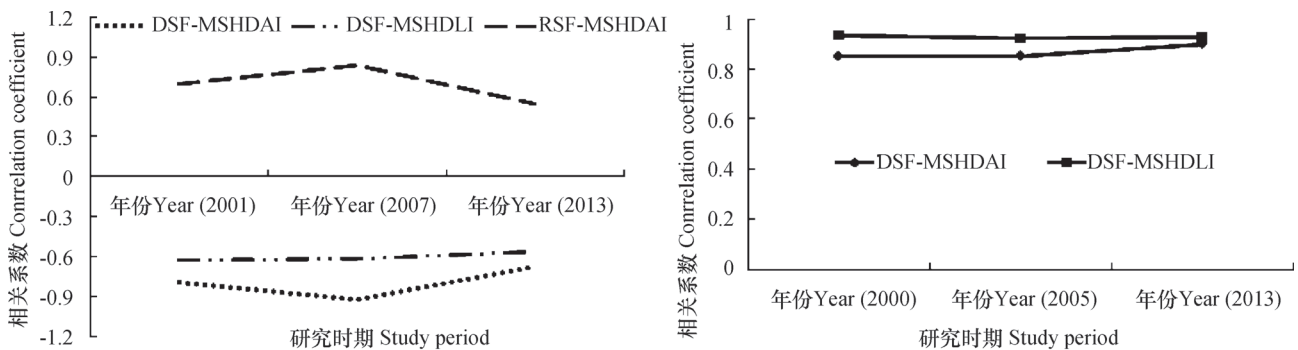


图7 地表水体指数间相关系数在不同粒度下的关联曲线

Fig. 7 Correlation curves of the correlation coefficients between surface water body indices as affected by grain size in the study areas

3 结论

随着空间粒度的增加,土壤多样性指数DSF和RSF的粒度响应基本上属于为“无响应型”,地表

水体指数MSHDAI和MAHDLI均是“下降型”。且在研究区的3个研究时期,土壤和水体多样性相关性较好的县域有河南省襄城县和江苏省吴江区,这与二者的平原地形有关,对襄城县和吴江区有相关

性的指数间相关系数的粒度效应进行研究发现2个县域相关系数的关联曲线并未发生本质性的变化,说明襄城县和吴江区土壤和地表水体间的相关性较好,且在研究区内没有区域差异。相关性不稳定的县域有林县、溧水县和固始县,源自三者丘陵和山地居多。如皋市由于水网密度过大,没有表现出相关性。此外,6个研究区域二者的相关性可能会受到人类活动强度大小的影响。需要指出的是,溧水县西南部面状湖泊的分布在一定程度上加剧了相关关系的不稳定性,这或许与湖泊的宽度和多样性指数的设定有关,将在今后的研究中继续探索。

参考文献

- [1] 赵明松, 张甘霖, 王德彩, 等. 徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及中控因素分析. 土壤学报, 2013, 50 (1) : 1—11. Zhao M S, Zhang G L, Wang D C, et al. Spatial variability of soil organic matter and its dominating factors in Xu-huai alluvial plain (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (1) : 1—11
- [2] 史舟, 李艳. 地统计学在土壤中的应用. 北京: 中国农业出版社, 2006: 109—112. Shi Z, Li Y. *Geostatistics and its application in soil science* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2006: 109—112
- [3] Ibáñez J J, Jiménez-Ballesta R, García-Álvarez A. Soil landscapes and drainage basins in Mediterranean mountain areas. *Catena*, 1990, 17: 573—583
- [4] Ibáñez J J, De-Alba S, Bermúdez F F, et al. Pedodiversity: Concepts and measures. *Catena*, 1995, 24: 215—232
- [5] Ibáñez J J, Bockheim J. *Pedodiversity. USA: Science Publishers, CRC Press*, 2013: 1—258
- [6] 张学雷. 土壤多样性: 土壤地理学研究的契机. 土壤, 2014, 46 (1) : 1—6. Zhang X L. Pedodiversity: An opportunity for soil geographic studies (In Chinese). *Soils*, 2014, 46 (1) : 1—6
- [7] 张学雷, 王辉, 张薇, 等. 土壤系统分类与生物系统分类体系中的多样性特征对比分析. 土壤学报, 2008, 45 (1) : 1—8. Zhang X L, Wang H, Zhang W, et al. Comparison of diversity characteristics between pedological and biological taxonomies (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (1) : 1—8
- [8] 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. 土壤学报, 2011, 48 (5) : 893—903. Duan J L, Zhang X L. Correlative evaluation of pedodiversity and land use diversity based on Shannon entropy (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (5) : 893—903
- [9] 张学雷, 陈杰, 檀满枝, 等. 土壤多样性理论方法的新近发展与应用. 地球科学进展, 2003, 18 (3) : 374—379. Zhang X L, Chen J, Tan M Z, et al. Some most recent research progress on pedodiversity (In Chinese). *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18 (3) : 374—379
- [10] 任圆圆, 张学雷. 土壤多样性研究趋势与未来挑战. 土壤学报, 2015, 52 (1) : 9—18. Ren Y Y, Zhang X L. Study on Pedodiversity: Status quo and future challenge (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (1) : 9—18
- [11] 段金龙, 张学雷. 中国中、东部典型样区土壤与水体多样性关联分析. 水科学进展, 2012, 23 (5) : 635—641. Duan J L, Zhang X L. Correlative analysis of pedodiversity and spatial distribution of water body diversity at different scales in East and Central China (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2012, 23 (5) : 635—641
- [12] 刘彦随, 甘红, 张富刚. 中国东北地区农业水土资源匹配格局. 地理学报, 2006, 61 (8) : 847—854. Liu Y S, Gan H, Zhang F G. Analysis of the matching patterns of land and water resources in northeast China (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61 (8) : 847—854
- [13] 姜秋香, 付强, 王子龙, 等. 三江平原水土资源空间匹配格局. 自然资源学报, 2011, 26 (2) : 270—277. Jiang Q X, Fu Q, Wang Z L, et al. Spatial matching patterns of land and water resources in Sanjiang plain (In Chinese). *Journal of Natural Resources*, 2011, 26 (2) : 270—277
- [14] 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. 农业机械学报, 2013, 44 (6) : 110—116. Duan J L, Qu Y H, Zhang X L. Correlative analysis between surface water spatial distribution diversity and pedodiversity (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44 (6) : 110—116
- [15] Ibáñez J J, Jiménez-Ballesta R, García-Álvarez A. Soil landscapes and drainage basins in Mediterranean mountain areas. *Catena*, 1990, 17: 573—583
- [16] Ibáñez J J, Pérez-González A, Jiménez-Ballesta R, et al. Evolution of fluvial dissection landscapes in mediterranean environments// Quantitative estimates and geomorphological, pedological and phytocenotic repercussions. *Z. Geomorph N F*. 1994, 37: 123—138
- [17] Arnett R R, Conacher A J. Drainage basin expansion and the nine unit landsurface model. *Australia Geographer*, 1973, 12: 237—249

- [18] Yabuki T, Matsumura Y, Nakatani Y. Evaluation of pedodiversity and land use diversity in terms of the Shannon entropy. <http://cdsweb.cern.ch/record/1178038>, 2009.05.19
- [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. 人民黄河, 2014, 36(4): 47—49. Qu Y H, Zhang X L, Duan J L. Analysis of surface water spatial distribution diversity for the case areas of Henan Province (In Chinese). Yellow River, 2014, 36(4): 47—49
- [20] 齐少华, 张学雷, 段金龙. 河南省地表水时空分布特征研究. 河南农业科学, 2013, 42(11): 64—67. Qi S H, Zhang X L, Duan J L. Characteristics of surface water temporal and spatial distribution in Henan Province (In Chinese). Journal of Henan Agricultural Sciences, 2013, 42(11): 64—67
- [21] 冯湘兰. 景观格局指数相关性粒度效应研究. 湖南: 中南林业科技大学, 2010. Feng X L. The research on granularity effect of correlations among landscape pattern metrics—Case on West Dongting Lake Region process (In Chinese). Hunan: Central South University of Forestry and Technology, 2010
- [22] 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. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1167—1173. Xu L, Bian X Q, Qin X L, et al. Effects of grain size change on landscape pattern indices of Hefei City (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(5): 1167—1173
- [23] 王聘同, 袁春, 张寅玲. 县域土地覆盖景观特征的粒度效应研究. 内蒙古农业大学学报, 2013, 34(5): 35—41. Wang D T, Yuan C, Zhang Y L. Effects of spatial grain size on landscape pattern of land-cover types at county-level (In Chinese). Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2013, 34(5): 35—41
- [24] 邬建国. 景观生态学—格局过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2007. Wu J G. Landscape ecology—Pattern process, scale and level (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2007
- [25] 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. 生态学报, 2008, 28(6): 2753—2763. Zhu M, Pu L J, Li J L. Effects of varied remote sensor spatial resolution and grain size on urban landscape pattern analysis (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2753—2763
- [26] 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. 生态学报, 2012, 32(12): 3764—3772. Guo G H, Chen Y B, Wei J B, et al. Impacts of grid sizes on urban heat island pattern analysis (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12): 3764—3772
- [27] 任圆圆, 张学雷. 不同空间粒度下地表水体分布格局多样性的研究. 农业机械学报, 2014, 46(4): 168—175. Ren Y Y, Zhang X L. Distribution patterns of surface water body diversity at different grain sizes (In Chinese). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 46(4): 168—175
- [28] 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. 生态学报, 2003, 23(12): 2506—2519. Shen W J, Wu J G, Lin Y B, et al. Effects of changing grain size on landscape pattern analysis (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(12): 2506—2519

EFFECT OF GRAIN SIZE ON AND CORRELATION ANALYSIS OF PEDODIVERSITY AND SURFACE WATER BODY DIVERSITY IN COUNTIES TYPICAL OF CENTRAL AND EAST CHINA

Ren Yuanyuan Zhang Xuelei[†]

(School of Hydraulic and Environmental Engineering, Zhengzhou University, Institute of Natural Resources and Eco-environment, Zhengzhou 450001, China)

Abstract Six counties, typical of Henan and Jiangsu are selected in a case study on application of the spatial grain size method on a 1 km × 1 km grid scale to exploration of soil diversity of dominant and rare soil families (DSF and RSF), type of grain size effects on MSHDAI and MSHDLI, and grain size effects on correlativity and correlations between the four indices and their stabilities. In terms of soil diversity, soil families, the highest in diversity index and in soil patch area as well are deemed as dominant ones.

Counties dominated with plains in terrain are the lowest in number of soil families, while those dominated with hills are the highest. For instance, in Rugao County, the water network, being too high in density, plays a unique role in the study on correlativity between pedodiversity and surface water body diversity. With rising spatial grain size, the grain size effects on both DSF and of RSF fall basically into the type of “non-responsive”, suggesting that the two indices are not sensitive to changes in spatial grain size, or that they are relatively stable. However, when RSF is located at the edge of the study area, soil patches change in shape with grain size, which in turn affects stability of the pedodiversity. In the research of surface water body diversity, the effects of grain size on MSHDAI and MAHDLI are both of the “declining type”. In the study areas, regardless of research period, the relationships in terms of scale effect between MSHDLI and MSHDAI and between their means are all polynomial functions, which indicates that as time goes on, changes of the water bodies in either area or shape do not affect the fitted functional relationship between the two indices. With rising spatial grain size, the correlations between pedodiversity and the surface water body diversity exist in two types, “stable type” (including unchanged significant positive relationship, unchanged significant negative relationship and unchanged non-existence of significant relationship) and “unstable type”. To sum up, of the six counties under study, Xiangcheng of Henan and Wujiang of Jiangsu are the most stable ones, which is attributed to their plain-dominated terrains, while Linzhou and Gushi of Henan and Lishui of Jiangsu are unstable ones, which is attributed to their hill-dominated terrain. Rugao, owing to its high water network density does not show any correlation between pedodiversity and surface water body diversity. It should be pointed out that the distribution of planar lakes in the southwest of Lishui is contributing to a certain extent, to the instability of the correlation, which might be associated with the setting of width and diversity index of lakes. So more efforts should be made in futuring research in this field. The study on effects of grain size on correlation coefficient of related indices in Xiangcheng and Wujiang reveals that in Xiangcheng exists a significant positive correlation between RSF with MSHDAI, and a significant negative one between DSF and MSHDAI and between DSF and MSHDLI, whereas in Wujiang exist significant positive correlations between DSF and MSHDAI and between DSF and MSHDLI. The correlation curve of the correlation coefficients of the two counties remains essentially unchanged, which shows that the soils and surface water bodies are well correlated in the two counties, regardless of regions.

Results show that for the effects of grain size of the dominant soil family and rare soil family are basically of the type of “non-responsive”, and with rising grain size, the RSF located at the edge of the study area, declines in stability of pedodiversity; The effects of grain size on MSHDLI and MSHDAI are of the type of “Declining”, and when the relationship between the two or their means in scale effect fits the polynomial function, the fitting peaks in degree. During 2000 ~ 2013, the correlations between the indices of pedodiversity and the surface water body diversity in Xiangcheng and Wujiang were of the “Stable type” encompassing both positive and negative ones and never underwent any substantial changes, so they were quite stable while the correlations in Linzhou, Gushi and Lishui were so stable and that in Rugao was almost nil due to its highly dense water network. Therefore, it is quite clear that terrain, shape and density of the water bodies and human activities are the major factors affecting the relationship between pedodiversity and surface water body diversity.

Key words Soil; Surface water body; Diversity; Grain size; Correlation; Scale effect

(责任编辑: 檀满枝)