

地表水空间分布与土壤类别多样性关联分析*

段金龙 屈永慧 张学雷

(郑州大学自然资源与生态环境研究所, 郑州 450001)

摘要: 为探索水土资源在空间分布上的内在联系,选取河南省不同生态环境和社会发展条件下5个典型样区,将多样性理论与研究方法应用于地表水资源的空间分布离散性评价中。计算了各样区及样区分区域内1 km × 1 km 网格尺度下的地表水空间分布多样性和土壤类别构成组分多样性,并探索了两者之间的内在联系。研究表明:多样性理论与研究方法适用于水土资源分布的评价研究并具有广阔应用前景;水体总面积和其空间分布离散性之间存在线性正相关关系,大尺度样区下相关系数数值高达0.70,小尺度分区下减小为约0.45;水体空间分布离散性与土壤分类单元数目之间存在一定程度的负相关变化趋势,该趋势随研究区面积的增大和人类活动干扰的减弱而增强;水体分布对土壤类别的空间构成产生重要影响。

关键词: 地表水 土壤 多样性 关联分析

中图分类号: F323.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)06-0110-07

Correlative Analysis between Surface Water Spatial Distribution Diversity and Pedodiversity

Duan Jinlong Qu Yonghui Zhang Xuelei

(Institute of Natural Resources and Eco-environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Five typical case areas at different ecologic and environmental conditions and social development degrees in Henan province were chosen respectively to conduct the correlative analysis between spatial distribution of water and soil resources. Diversity theory and methodology were used in analyzing the spatial distribution discreteness of surface water. The spatial distribution diversity index in 1 km × 1 km grid scale of surface water and the soil constituent diversity index were calculated. The intrinsic relationships between them were finally explored. Results showed that the diversity theory and methodology had maneuverability and broad application prospects in the discreteness evaluation of water and soil distribution. There was a positive relationship between regional total area and spatial distribution discreteness of surface water, the correlation coefficient was about 0.70 at the broader case area scale and 0.45 at subarea smaller scale. There was a negative correlation trend between surface water spatial distribution diversity and soil family numbers, and this trend was enhanced with the increase of regional area or decrease of human disturbance. Water distribution has an important impact on the spatial constituent of the related soil families.

Key words: Surface water Soil Diversity Correlative analysis

引言

水分循环是五大成土因素综合作用中的重要一

环,水圈和土壤圈之间存在着复杂联系^[1-2],在当今中国水土资源匹配错位性^[3-4]的现状下对两者之间的关系进行研究具有重要意义。土壤多样性是近年

来土壤地理学研究领域的热点问题之一,该研究能够直观展现区域内全部或某一具体土壤类型在构成组分或空间分布上的异同^[5-9]。以往对区域水资源分布特征的研究多采用面积统计的方法,缺乏对水体空间分布特征的直观描述。较早研究中,土壤多样性的一些相关研究理论与方法已被证明适用于地表水的空间分布离散性评价,同时地表水和土壤的分布特征之间存在一定的内在联系^[10-11],但研究样区规模的设定、水土资源间关联分析数据量的选择等方面,仍有进一步研究的空间。

作为中国重要的农业大省,河南省总体上属于缺水省份^[12],对其水土资源间的内在联系进行研究具有重要的现实意义。本文以河南省的5个典型样区为例,评价不同地形、气候、经济等条件下各样区地表水资源空间分布的演变特点及其分布特征间的异同,从一个新的角度探索地表水资源和土壤资源在空间分布上的内在联系,以期为水土资源的可持续利用提供数据支持。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

综合考虑地形、气候、人文和经济等因素,选取河南省的5个典型样区参与研究(图1)。典型样区包括东部商丘市下辖的永城县、夏邑县和虞城县组成豫东样区(样区中心坐标为34°11'N,116°07'E);西部邻接的陕县、渑池县和洛宁县组成豫西样区(34°31'N,111°29'E);南部信阳市下辖的固始县和商城县组成豫南样区(32°01'N,115°37'E);北部邻接的林县、安阳县、汤阴县和浚县组成豫北样区(36°12'N,114°20'E);中部郑州市下辖的上街区、巩义市、登封市、荥阳市、新密市和新郑市组成豫中样区(34°34'N,113°19'E)。5个样区对比中,除豫南样区外,其他同属暖温带大陆性季风气候,年均降雨量均大于600 mm,农作物种植以小麦玉米轮作为主;豫南样区属亚热带向暖温带过渡气候,年均降雨量900~1400 mm,河湖众多,以水稻种植为主,耕地类型以水耕田为主。豫东样区完全由平原构成,其他样区均含有较大比例山地丘陵。本研究旨在探索水土资源间在空间分布上的内在联系,故在样区选取中排除了城市化程度较高的行政区域(如郑州市和安阳市的市辖区)。

1.2 研究基础数据

研究所用遥感数据均为美国地球资源卫星(Landsat)的TM或ETM+传感器数据(表1),分为两个时期(2001~2002年、2006~2009年),时期编码分别为I、II,数据获取季节基本相近,各样区的

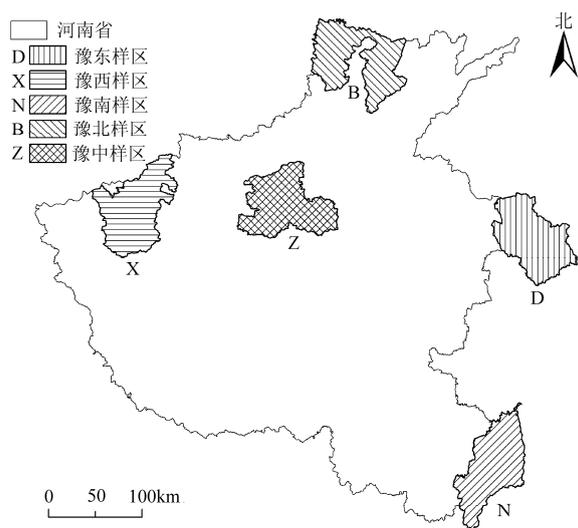


图1 典型样区分布

Fig. 1 Distribution of case areas

表1 遥感数据获取年份及相关统计数据

Tab. 1 Statistics of remote sensing data

研究区域	研究区面积/km ²	研究时期 I	研究时期 II
豫东样区	5 050.9	2002年4月13日	2006年5月2日
豫西样区	5 271.0	2001年5月1日	2006年5月23日
豫南样区	5 050.5	2002年4月13日	2007年4月19日
豫北样区	5 303.6	2001年4月24日	2009年6月25日
豫中样区	5 174.6	2001年5月10日	2007年5月19日

总面积均为5 100 km²左右。其他相关数据包括基于第二次土壤普查和系统分类参比下的土壤图矢量数据、各研究区行政区划矢量数据等。

1.3 研究方法

使用仙农熵变形公式以更好地评价对象的空间分布离散性^[13]

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

在土壤类别构成组分多样性中, S 表示土属个数, p_i 表示第 i 个土属在所有土属总面积里所占的比例,此时的多样性指数 Y_h 表示在研究区内土壤构成组分的多样性特征,即所有分类单元在数量构成上的均匀程度,这时 Y_h 形同Pielou均匀度指数。

在水体空间分布多样性中, S 表示空间网格的数目, p_i 表示第 i 个空间网格里水体的面积在水体总面积里所占的比例。此时的多样性指数 Y_h 表示在研究区内水体空间分布的多样性特征,它表征了水体分布的离散性程度,即空间分布的多样性格局。

两种情况下的多样性指数 Y_h 取值区间同为 $[0, 1]$,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。

研究首先对河南省 5 个典型样区的遥感数据进行土地利用分类并提取其中的水体信息, 计算了 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 网格尺度下各样区的水体空间分布多样性以及土壤类别构成组分多样性。探索了河南省不同地形、气候、经济和人文条件下地表水资源空间分布的变化特点及其与土壤类型分布之间的内在联系。然后将各样区按面积进行 5 等分, 计算了各分区内的水体空间分布多样性以及土壤类别构成组分多样性, 评价了河南省相似地形、气候、经济和人文条件下地表水资源空间分布的变化特点及其与土壤类型分布之间的内在联系。

2 结果与讨论

2.1 水体面积、空间分布多样性与土壤类别构成

本研究建立的土地利用分类体系中的水体主要

包括河流、湖泊、水库、鱼塘、灌溉用沟渠等地表水体。计算了各样区 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 网格尺度下的水体空间分布多样性以及以土属为基本分类单元的土壤类别构成组分多样性(表 2), 图 2 显示的是该网格尺度下豫西样区研究时期 I 地表水资源的分布情况, 其他样区和研究时期专题图略。研究发现, 当面积相近时, 样区内土壤类型个数与土壤类别构成组分多样性之间存在明显正相关关系(图 3a), 其一元线性回归方程为 $y = 0.0017x + 0.6967$, $R = 0.7900$ 。推断随土壤类型的增加, 研究区内各土壤类型在数量构成上变得更加复杂, 土壤作为一种重要的自然资源, 其分类单元的面积值大小具有随机性。结合各研究区实际, 发现地形以平原为主的豫东样区土属个数最少; 地形多山地丘陵的豫西和豫中样区土属个数最多, 这也与之前以地形为基础多样性分析结果^[14]相吻合。

表 2 水体信息和土壤信息统计

Tab.2 Statistics of water and soil information

研究区域	土属个数	土壤类别构成组分多样性指数	时期 I 水体	时期 I 水体	时期 II 水体	时期 II 水体	水体总面积平均值 /km ²	水体空间分布多样性指数平均值
			总面积 /km ²	空间分布多样性指数	总面积 /km ²	空间分布多样性指数		
豫东样区	14	0.718	69.8	0.807	84.9	0.823	77.4	0.815
豫西样区	41	0.755	83.7	0.723	90.7	0.720	87.2	0.722
豫南样区	35	0.756	318.7	0.914	415.5	0.918	367.1	0.916
豫北样区	37	0.778	36.0	0.701	55.6	0.768	45.8	0.735
豫中样区	46	0.774	119.6	0.716	87.1	0.707	103.4	0.712

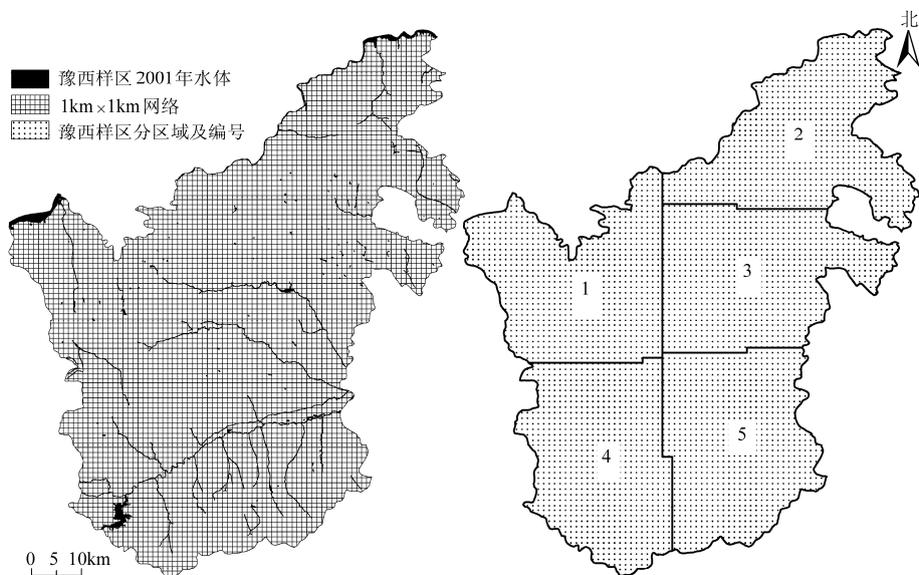


图 2 豫西样区 2001 年水体及分区域分布

Fig.2 Distribution pattern of water in 2001 and subarea of western Henan

水体总面积与水体空间分布多样性之间存在明显的正相关关系(图 3b、3c), 时期 I 的一元线性回归方程为 $y = 0.0007x + 0.6867$, $R = 0.7293$; 时期 II 为 $y = 0.0005x + 0.7175$, $R = 0.6911$, 如豫南样

区 2 个时期数据的水体总面积和其空间分布多样性都取最大值, 推断随样区内水体总面积的增加, 水体的空间分布离散性一般也呈增加趋势。两个时期水体面积变化的比较中, 发现除豫中样区外(时期 II

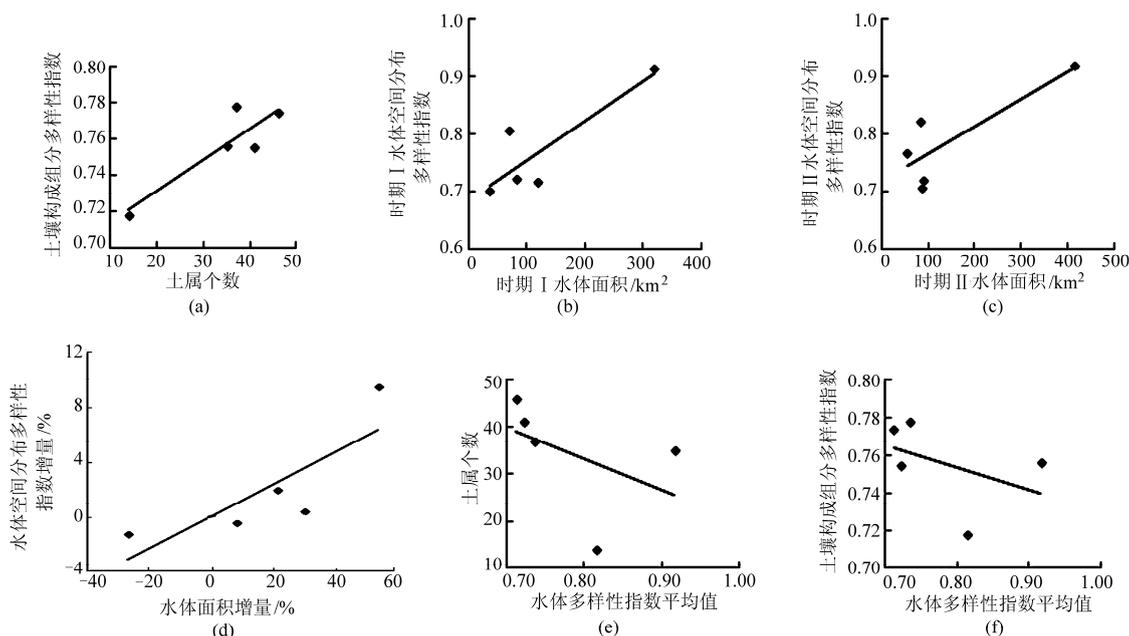


图3 地表水资源与土壤资源分布间的内在联系

Fig. 3 Internal relationships between surface water and soil resources distribution

- (a) 土属个数与土壤构成 (b) 时期 I 水体面积与水体分布 (c) 时期 II 水体面积与水体分布
(d) 水体面积增量与水体分布增量 (e) 水体分布平均值与土属个数 (f) 水体分布平均值与土壤构成

比时期 I 减少 27.17%), 其他各样区均有不同程度增加 (豫东、豫西、豫南和豫北样区分别增加 21.63%、8.36%、30.37% 和 54.44%)。两个时期水体空间分布多样性变化的比较中, 发现豫西和豫中样区各减少 0.41% 和 1.26%, 豫东、豫南和豫北样区各增加 1.98%、0.44% 和 9.56%。上述两组数据比较中, 发现水体面积的变化量与水体空间分布多样性的变化量之间呈一定的正相关关系 (图 3d), 其一元线性回归方程为 $y = 0.1176x - 0.0004$, $R = 0.6603$, 即水体面积的增加或减少往往带来水体空间分布离散性的增强或减弱。研究发现水体面积的变化程度比水体空间分布多样性的变化程度剧烈很多, 这也与早先研究中空间分布多样性数值的对数函数变化曲线相一致^[15], 即随着区域地表水面积的线性增加, 区域内水体空间分布多样性的增加速度逐渐减慢。

从以上研究可以发现水体空间分布多样性直观反映出研究区内水体分布的离散性程度, 而水体总面积直观反映出研究区内的地表水总量。多样性的引入对于评价区域地表水资源分布具有实际意义, 为传统宏观上的面积统计方法提供了重要的数据补充。

为深入分析研究区内土壤资源与地表水资源在空间分布上的内在联系, 同时为减弱不同时相遥感数据间地表水的分布差异, 计算了两个时期水体总面积和空间分布多样性的平均值 (表 2)。研究发现, 各样区内水体空间分布多样性的平均值和土属

个数以及该平均值和土壤类别构成组分多样性之间均存在一定程度的负相关变化趋势 (图 3e、3f), 一元线性回归方程分别为 $y = -64.6062x + 84.9928$, $R = 0.2064$ 和 $y = -0.1172x + 0.8476$, $R = 0.1814$ 。如去除豫南样区数据点 (图 3e、3f 中的最右端数据点), 其余 4 样区的数据点将遵循更加明显的线性负相关关系。造成这种现象的原因是在研究初期土地利用分类中, 除豫南样区外, 其余各样区地表水主体均由河流、湖泊和水库构成, 而遥感数据获取日正值水稻播种期, 豫南样区除上述水体类型外, 水耕地占据很大比例, 假设去除水耕地影响, 豫南样区的地表水面积和空间分布多样性都将出现大幅降低, 在此条件下, 5 个样区水体空间分布多样性平均值与土属个数或土壤类别构成组分多样性之间将遵循更为明显的线性负相关关系。由此推断在自然状态下 (地表水主体由河流、湖泊等非人为性水体构成), 水体的空间分布多样性与土壤类型的个数或土壤类别构成组分多样性之间存在负相关关系, 即地表水体更广泛更离散分布特征, 往往造成区域内土壤类型个数的减少和土壤类别的简单性构成。造成这一现象的根本原因目前仍不清楚, 现推断为相比于其他成土因素, 水体的流动性特征能够更加快捷地稀释土壤中的养分及其他可溶性物质, 造成不同区域土壤间物理与化学性质的迁移^[16-17], 因此高分布离散性的水体往往造成区域内土壤间性质的相似性构成, 即土壤类型数量减少; 相反低分布离散性的水体构成间接造成区域内土壤间性质更加剧烈的变

化,即土壤类型数量增加,土壤的构成组分更加复杂。这一推论的成立将对水要素在成土因素中的作用提供重要的数据支持。

2.2 分区域水体面积、空间分布多样性与土壤类别构成

之前5个样区分析对比中,各样区之间存在较多的地形、气候、人文和经济等因素的干扰,如豫北样区和豫南样区气候上的明显差异,豫西样区和豫

东样区地形上的明显差异等。为更深入探讨及评价多样性理论在地表水资源中的应用和水土资源在空间分布上的内在联系,将对每个样区进行分区域研究。如图2所示,按照临近原则将每个样区分为面积相等的(误差低于 1 km^2)5个下属分区域,每个分区域面积约为 $1\ 000\text{ km}^2$,计算了各样区分区域的水体面积、水体空间分布多样性和土属个数、土壤类别构成组分多样性(表3)。

表3 分区域水体信息和土壤信息统计

Tab.3 Statistics of water and soil information in subareas

分区 编号	土属 个数	土壤类别构 成组分多样 性指数	时期 I 水	时期 I 水体	时期 II 水	时期 II 水体	水体总面 积平均值 / km^2	水体空间 分布多样性 指数平均值
			体总面积 / km^2	空间分布多 样性指数	体总面积 / km^2	空间分布多 样性指数		
D1	9	0.778	15.2	0.768	19.4	0.784	17.3	0.776
D2	6	0.729	13.1	0.747	16.2	0.786	14.7	0.767
D3	6	0.857	15.3	0.785	15.0	0.788	15.1	0.787
D4	8	0.858	12.4	0.777	16.4	0.791	14.4	0.784
D5	10	0.788	13.8	0.733	17.9	0.767	15.8	0.750
X1	20	0.776	21.8	0.617	17.9	0.621	19.9	0.619
X2	28	0.732	22.1	0.690	31.3	0.675	26.7	0.683
X3	16	0.671	8.5	0.660	7.1	0.660	7.8	0.660
X4	19	0.806	18.0	0.635	19.2	0.640	18.6	0.638
X5	16	0.857	13.3	0.757	15.1	0.755	14.2	0.756
N1	20	0.767	31.4	0.889	38.7	0.898	35.1	0.894
N2	13	0.798	28.2	0.903	39.7	0.907	33.9	0.905
N3	21	0.770	136.9	0.951	168.3	0.953	152.6	0.952
N4	16	0.752	88.9	0.943	133.6	0.952	111.3	0.948
N5	13	0.866	33.3	0.821	35.3	0.819	34.3	0.820
B1	16	0.657	6.7	0.623	8.1	0.628	7.4	0.626
B2	18	0.732	7.5	0.661	8.4	0.679	8.0	0.670
B3	16	0.883	6.0	0.614	11.5	0.711	8.7	0.663
B4	16	0.801	10.7	0.639	12.8	0.738	11.8	0.689
B5	17	0.855	5.1	0.648	14.9	0.778	10.0	0.713
Z1	30	0.798	39.7	0.663	25.8	0.660	32.7	0.662
Z2	16	0.639	40.0	0.694	29.5	0.675	34.8	0.685
Z3	27	0.775	11.6	0.663	8.3	0.633	10.0	0.648
Z4	21	0.673	13.0	0.556	10.8	0.527	11.9	0.542
Z5	18	0.790	15.4	0.733	12.7	0.731	14.1	0.732

注:分区编号 D1~D5 为豫东样区, X1~X5 为豫西样区, N1~N5 为豫南样区, B1~B5 为豫北样区, Z1~Z5 为豫中样区。

与之前研究结果不同,分区域土壤类型个数和土壤类别构成组分多样性之间不存在明显联系(图4a),其一元线性回归方程为 $y = -0.002\ 3x + 0.814\ 9$, $R = 0.044\ 9$,推断随研究区面积的减小,土壤类型数目与土壤类别构成组分多样性之间的正相关关系不断减弱。与上节研究结果相同,等面积条件下各样区分区域内所含土属个数一般不同,再次证明了土壤分类在空间分布上具有明显的不连续性。两时期分区域水体总面积、空间分布多样性之间均存在较为明显的正相关关系(图4b、4c),时期 I 的一元线性回归方程为 $y = 0.002\ 5x + 0.664\ 0$, $R = 0.454\ 4$;时期 II 为 $y = 0.001\ 9x + 0.686\ 1$, $R = 0.456\ 3$,即分区域水体总面积的增加往往造成水体

空间分布离散性的增强。

为深入分析各分区域内土壤资源和地表水资源在空间分布上的内在联系,同时为减弱不同时相遥感数据间地表水的分布差异,计算了两个时期分区域水体总面积和空间分布多样性的平均值(表3)。研究发现,各分区域水体空间分布多样性平均值与土属个数之间存在一定程度上的负相关变化趋势(图4d),一元线性回归方程为 $y = -18.997\ 7x + 30.594\ 2$, $R = 0.106\ 3$ 。由于之前所述豫南样区分区域数据点后重新进行线性回归分析,发现其余各分区域水体空间分布多样性平均值与土属个数之间存在较为明显的负相关关系(图4e),方程为 $y =$

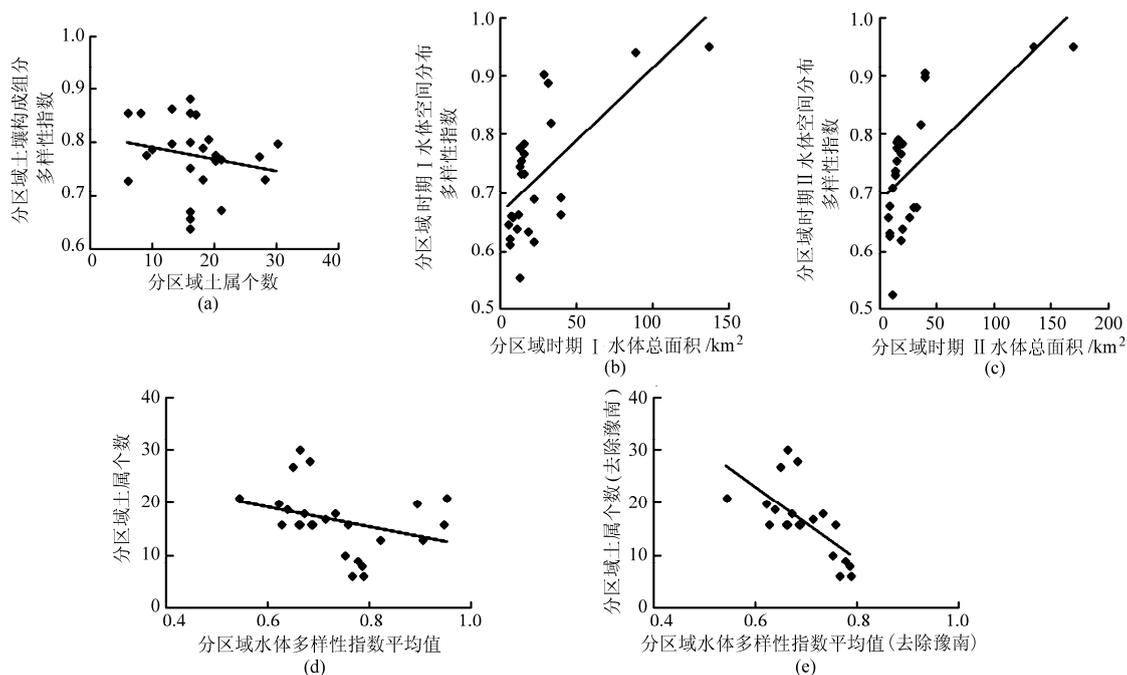


图4 分区域地表水资源与土壤资源分布间的内在联系

Fig. 4 Internal relationships between surface water and soil resources distribution in subareas

(a) 分区域土属个数与土壤构成 (b) 分区域时期 I 水体面积与水体分布 (c) 分区域时期 II 水体面积与水体分布
(d) 分区域水体分布平均值与土属个数 (e) 分区域水体分布平均值与土属个数(去除豫南)

$-69.0281x + 64.4347$, $R = 0.4445$ 。由此推断在较小尺度下,水体空间分布离散性的增强也易导致区域内土壤分类单元数目的减少,而这一变化趋势在纯自然状态下也将会体现得更加明显。

研究发现,在较大尺度样区和较小尺度分区下,水体面积、水体空间分布多样性和土属数目之间存在非常相似的内在联系,这些联系在大尺度下体现得更为明显(大尺度下的相关系数均明显高于小尺度)。这一现象也与其他自然资源分布中广泛存在的分形结构和自相似性特征相一致^[18-20]。因此,对水土资源空间分布的内在联系进行研究能为水资源利用、水土保持、土壤改良等研究领域提供新的角度和重要的数据支持。本文的研究内容和方法虽取得一定进展,但尚在探索阶段,涉及到多学科的交叉与融合,研究的深度和广度仍有较大的挖掘空间。

3 结论

(1) 多样性的引入为地表水资源分布研究中传统的面积统计方法提供了重要的数据补充,研究为水土资源的关联分析提供一个新的途径,显示出多样性理论在包括水土资源的各类自然资源要素的分布特征评价中具有广阔的应用前景。

(2) 水体总面积和其空间分布多样性之间存在明显的正相关关系,大尺度下相关系数达到 0.70,小尺度下也达到 0.45,即区域内水体面积的增加往往造成区域水体分布离散性的增强。

(3) 水体空间分布多样性与土壤类型数目之间存在负相关变化趋势,该趋势在自然状态下体现得更为明显,在大尺度下也将体现得更为明显。

参 考 文 献

- 余世鹏, 杨劲松, 刘广明. 易盐渍区粘土夹层对土壤水盐运动的影响特征[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 495~501.
Yu Shipeng, Yang Jingsong, Liu Guangming. Effect of clay interlayers on soil water-salt movement in easily-salinized regions [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(4): 495~501. (in Chinese)
- 陈世平, 李毅, 高金芳. 覆膜开孔蒸发条件下斥水土壤水盐变化规律[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 86~91.
Chen Shiping, Li Yi, Gao Jinfang. Evaporation experiment on different water repellent soils under perforated plastic mulch [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 86~91. (in Chinese)
- 刘彦随, 甘红, 张富刚. 中国东北地区农业水土资源匹配格局[J]. 地理学报, 2006, 61(8): 847~854.
Liu Yansui, Gan Hong, Zhang Fugang. Analysis of the matching patterns of land and water resources in northeast China [J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(8): 847~854. (in Chinese)
- 姜秋香, 付强, 王子龙, 等. 三江平原水土资源空间匹配格局[J]. 自然资源学报, 2011, 26(2): 270~277.
Jiang Qiuxiang, Fu Qiang, Wang Zilong, et al. Spatial matching patterns of land and water resources in Sanjiang plain [J].

- Journal of Natural Resources, 2011, 26(2): 270 ~ 277. (in Chinese)
- 5 Ibáñez J J, Caniego J, San-José F, et al. Pedodiversity-area relationships for islands [J]. *Ecological Modelling*, 2005, 182(3 ~ 4): 257 ~ 269.
 - 6 Saldaña A, Ibáñez J J. Pedodiversity, connectance and spatial variability of soil properties, what is the relationship [J]. *Ecological Modelling*, 2007, 208(2 ~ 4): 342 ~ 352.
 - 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[J]. *土壤学报*, 2008, 45(1): 1 ~ 8. Zhang Xuelei, Wang Hui, Zhang Wei, et al. Comparison of diversity characteristics between pedological and biological taxonomies [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(1): 1 ~ 8. (in Chinese)
 - 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[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)
 - 9 Zhang Xuelei, Wang Hui, Xiao Guangping. Nestedness analysis of land use change on pedodiversity under the intensive urbanization process [C] // Robert J G Nattaporn P. 19th World Congress of Soil Science Proceedings, Soil Solutions for a Changing World. Brisbane, Australia, 2010, 1: 163 ~ 166.
 - 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. 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)
 - 11 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): 2 812 ~ 2 820. 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): 2 812 ~ 2 820. (in Chinese)
 - 12 左其亭, 张云, 林平. 人水和谐评价指标及量化方法研究[J]. *水利学报*, 2008, 39(4): 440 ~ 447. Zuo Qiting, Zhang Yun, Lin Ping. Index system and quantification method for human-water harmony [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(4): 440 ~ 447. (in Chinese)
 - 13 Yabuki T, Matsumura Y, Nakatani Y. Evaluation of pedodiversity and land use diversity in terms of the Shannon entropy [DB/OL]. [2009-05-19] <http://cdsweb.cern.ch/record/1178038>.
 - 14 Tan Manzhi, Zhang Xuelei, Chen Jie, et al. Pedodiversity: a case study based on 1:1 million scale SOTER of Shandong province, China [J]. *Pedosphere*, 2003, 13(3): 219 ~ 226.
 - 15 段金龙, 张学雷, 吴强. 区域土壤多样性的格局、评价与意义——以河南省为例[C] // 中国土壤学会第十二次全国会员代表大会暨第九届海峡两岸土壤肥科学术交流研讨会论文集: 面向未来的土壤科学(下册). 成都: 电子科技大学出版社, 2012: 1 681 ~ 1 689.
 - 16 潘月鹏, 阎百兴, 陆永正, 等. 不同利用类型土壤剖面溶解性铁的含量与迁移特征[J]. *土壤通报*, 2007, 38(6): 1 234 ~ 1 236. Pan Yuepeng, Yan Baixing, Lu Yongzheng, et al. Distribution of water-soluble ionic iron in profiles of soils in Sanjiang plain, northeast of China [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(6): 1 234 ~ 1 236. (in Chinese)
 - 17 孙瑞娟, 王德建, 林静慧, 等. 有机肥施用对水田土壤溶液氮磷动态变化及环境的潜在影响[J]. *土壤*, 2009, 41(6): 907 ~ 911. Sun Ruijuan, Wang Dejian, Lin Jinghui, et al. Variation of N&P contents in paddy soil water and its potential environmental effect under pig manure application [J]. *Soils*, 2009, 41(6): 907 ~ 911. (in Chinese)
 - 18 Ibáñez J J, Pérez-Gómez R, San José Martínez F. The spatial distribution of soils across Europe: a fractal approach [J]. *Ecological Complexity*, 2009, 6(3): 294 ~ 301.
 - 19 Ibáñez J J, Arnold R W, Ahrens R J. The fractal mind of pedologists (soil taxonomists and soil surveyors) [J]. *Ecological Complexity*, 2009, 6(3): 286 ~ 293.
 - 20 管孝艳, 杨培岭, 吕焯. 基于多重分形的土壤粒径分布与土壤物理特性关系[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(3): 44 ~ 50. Guan Xiaoyan, Yang Peiling, Lü Ye. Relationships between soil particle size distribution and soil physical properties based on multifractal [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(3): 44 ~ 50. (in Chinese)