

土壤与地表水体空间分布格局的交互关系研究^①

段金龙¹, 张戈², 任圆圆³, 张学雷^{4*}, 李卫东¹

(1 河南工业大学信息科学与工程学院, 郑州 450001; 2 河南省农业科学院作物设计中心, 郑州 450003; 3 郑州轻工业学院社会发展研究中心, 郑州 450002; 4 郑州大学自然资源与生态环境研究所, 郑州 450001)

摘要: 以中国中部典型农业区的土壤和地表水体数据为例, 基于改良的土壤多样性计量方法计算并统计了1 km网格尺度下的土壤类型个数、土壤构成组分多样性、土壤空间分布多样性和地表水体空间分布多样性等多类数据指数, 探索了区域土壤与地表水体在地理空间分布格局上的内在联系。结果表明: ①研究区内最具代表性土类潮土和褐土(两者面积加和占研究区总面积85%, 两者空间分布多样性均大于0.8)的空间分布格局与区域地表水体的空间分布格局之间存在数据联系, 回归分析中的判定系数 R^2 大于0.5, 这与水要素在两种土壤类型成土过程中所起的作用密切相关。②研究区面积的增加一般会造成地表水体对区域内土壤类型数量的影响作用减弱。与其他成土因素相比, 水要素在土壤形成中影响作用的重要程度与研究尺度的大小有关。③基于资源地理空间分布离散性分析的土壤多样性计量方法及理论为水、土等不同资源类型的空间分布格局评价及其交互关系研究提供了理论及数据支持。

关键词: 土壤多样性; 地表水体; 土壤形成; 河南省

中图分类号: S151; P966 文献标志码: A

Study on Interactive Relationship Between Spatial Distribution Pattern of Soil and Surface Water

DUAN Jinlong¹, ZHANG Ge², REN Yuanyuan³, ZHANG Xuelei^{4*}, LI Weidong¹

(1 College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2 Crop Design Center, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450003, China; 3 Social Development Research Center, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China; 4 Institute of Natural Resources and Eco-environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: An improved pedodiversity methodology was applied for exploring the intrinsic relationship of the geo-spatial distribution patterns between the regional soil and surface water in a typical agricultural region of central China. Several parameters, such as the number of soil types, soil constituent diversity, soil spatial distribution diversity, and surface water spatial distribution diversity, were calculated and analyzed with 1 km grid scale. The results showed that the most representative soil groups in the study area were Ochri-Aquic Cambosol and Hapli-Ustic Argosol, and whose area in total accounted of 85% of the total area of the study region and their spatial distribution diversity were greater than 0.8. There was a data connection between the spatial distribution pattern of these two representative soil groups and the spatial distribution pattern of the regional surface water, the coefficient of determination (R^2) was above 0.5, which was closely related to the role of water factor in soil-formation process of these two soil groups. The increase in the area of the study region would generally reduce the effect of surface water on the number of regional soil types. Compared with other soil-forming factors, the importance of the influence of water factor in soil formation was related to the size of study scale. The improved measurement methods and theories of pedodiversity which based on the discreteness analysis of the geo-spatial distribution of resources could provide a theoretical and data support for the evaluation of the spatial distribution pattern of different resource types (such as water and soil) and their interactive relationship.

Key words: Pedodiversity; Surface water; Soil formation; Henan Province

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41701237; 41571208)资助。

* 通讯作者(ZXLzzu@zzu.edu.cn)

作者简介: 段金龙(1984—), 男, 河南民权人, 博士, 讲师, 主要从事地理信息及水土资源遥感研究。E-mail: 215385212@qq.com

耕地质量下降、水土流失、土壤酸化、土壤退化、生物多样性减少等问题都对当代中国的粮食安全造成影响^[1]。土壤是农业生产的基矗，土壤的肥沃程度和灌溉条件直接决定了农作物的生长发育状况。气候、生物、母质、地形、时间、内动力地质作用以及人类活动等因素都对土壤的发生产生影响，而降水因素是影响土壤发生的最主要气候因素之一^[2]。河流、湖泊等地表水体类型是水资源的重要组成部分，地表水体时空分布与大气降水之间存在着密切联系^[3-4]，因此地表水体时空分布与土壤发生间也存在直接联系。与此同时，如何对土壤和水这类自然资源类型的空间分布格局进行有效的定量化表达对粮食安全问题的相关研究也具有一定意义。土壤多样性(pedodiversity)是21世纪以来世界土壤地理学研究领域的前沿性内容^[5-8]，它可以定量化地描述土壤的空间变异性和平不同土壤类型的分布格局问题，为土壤发生、土壤资源保护和可持续合理利用提供理论及数据支持。近年来，基于土壤多样性的相关研究结合了地形地貌^[9]、数学结构^[10-11]、土壤资源保护^[12]、土地利用变化^[13-15]、自然遗产^[16]等不同研究要素，使土壤多样性这一研究专题在国内外均获得了长足发展。

土壤多样性理论与研究方法在21世纪初引入中国^[17-18]，涉及该领域的报道近年来出现了系列性研究^[19-23]。在本项目的前期研究中，为深入探索水要素在土壤形成中所起的作用，使用了一种改良的土壤多样性计量方法并尝试将其引入水、土资源间的关联性分析中，这些研究发现地表水体的空间分布与区域内的土壤种类构成存在一定联系^[24]。但这些研究结论是在市县级别(面积低于5000 km²)^[24]的研究区数据中获得，研究尺度较小，相关研究结论是否具有普适性仍存疑问，同时前期研究内容仅分析了地表水体对区域土壤构成的影响作用，并未分析土壤分布对水体空间分布的反向影响。以上述研究内容为理论和方法基础，以中国中部典型农业区为例，本研究探索了地表水体分布对区域土壤构成的影响，然后从地理空间分布格局角度分析了具体土壤类型(以研究区内代表性土类为例)对区域地表水体分布的影响，以期对水、土两种重要自然要素在区域空间分布格局上的交互关系研究以及水要素在土壤形成中的作用评价进行进一步探索，并为计量土壤学的发展、区域土地资源的合理配置和农业发展提供理论及数据支持。

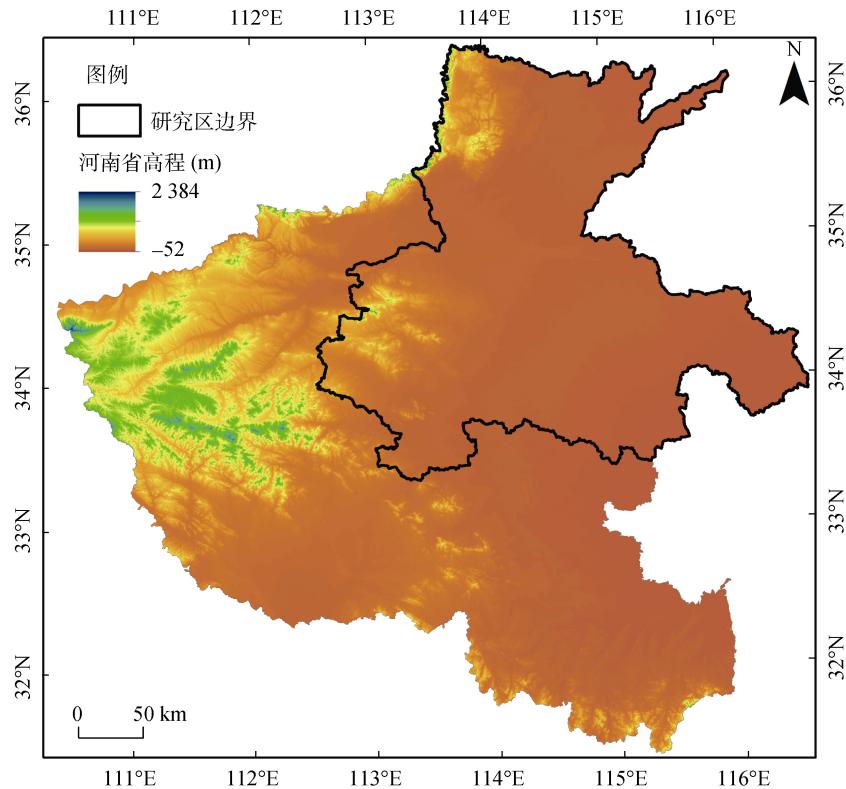


图1 研究区地理位置
Fig. 1 Geographic location of the study area

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取河南省中部、东部和北部的典型区域为研究区，包括平顶山市(部分区域)、漯河市(部分区域)、许昌市、郑州市、安阳市、鹤壁市、濮阳市、新乡市、开封市、商丘市和周口市(部分区域)，区域总面积 66 574 km²。区内地形多以平原为主，高程范围 -52 ~ 1 662 m，其中 86% 的区域高程值低于 200 m，为区域内的农业生产提供了有利条件。研究区属暖温带季风气候，四季分明，农业基础条件较好，以小麦-玉米轮作种植为主，是河南省小麦主产区，该区的粮食产出对河南省乃至全国粮食安全具有重要意义。研究区境内河流分属海河流域、黄河流域及淮河流域，年平均降水量 700 mm，土壤类型共包含 14 个土类、32 个亚类、94 个土属。

1.2 数据来源

研究选用 2000—2014 年美国 Landsat 系列卫星数据(其中 2013 年及以后数据使用 OLI_TIRS 传感器数据，其余使用 TM 或 ETM+ 传感器数据)，所有数据均获取自 5 月份左右，云量均小于 5%。其余研究数据包括基于第二次全国土壤普查的研究区土壤图矢量数据、行政区划矢量数据、DEM 数据、统计年鉴数据等。数据运行环境为 ENVI 4.8 和 ArcGIS 10.2。

1.3 研究方法

研究使用以下改良的土壤多样性计量方法^[13]对水、土资源的分布格局特征和关联性进行综合分析：

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

式中：S 和 p_i 的定义如下：①在土壤构成组分多样性里，S 表示土壤分类单元个数， p_i 表示第 i 个土壤类型在所有土壤类型总面积里所占的比例。在此前提下，多样性指数 Y_h 表示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。②在土壤(地表水体)空间分布多样性里，S 表示空间网格的数目， p_i 表示第 i 个空间网格里某个土壤类型(地表水体)的面积在该土壤类型(地表水体)总面积里所占的比例。在此前提下，多样性指数 Y_h 表示研究区内该土壤分类单元(地表水体)的空间分布多样性特征，它表征了单个土壤类型(地表水体)的空间分布离散性程度，即空间分布的多样性格局问题。两种情况下，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，例如研究区内只有一种土壤类型(情况①)或所有地表水体只分布在一个空间网格中(情况②)时， Y_h 取值趋于 0；当每个对象都均匀分布时，例如研究区内有多种土壤类型且各自面积相等(情况①)或地表水体在每个空间网格中均有分布且各自面积相等(情况②)时， Y_h 取值等于 1。在情况①下， Y_h 、 Y_h 的分子部分和 S 分别等同于传统土壤多样性计量方法中的 Pielou 均匀度指数、Shannon 多样性指数和丰富度指数，而情况②涉及空间网格概念，因此在评价系统内(土壤分类系统或土地利用分类系统等)特定分类单元的空间分布离散性特征(即地理空间分布格局问题)时表现得比传统土壤多样性计量方法更加直观和精确。

本研究首先对所选研究区的遥感数据进行土地利用监督分类，提取其中的地表水体信息(主要由河流、湖泊、水库、鱼塘、高等级沟渠等地表水资源类型组成)，地表水体的分类结果由基于 Google Earth 高清卫片的目视解译方法进行精度验证。2010 年开工的南水北调中线工程、近 20 年高速城市化发展造成土地利用变化、气候变化等因素都对研究区的地表水体分布特征造成了显著影响，为获取更加客观的研究区地表水体常态分布，本研究对基础遥感数据进行初期筛选，选择平均云量小于 5% 的 5 月份左右数据，同时每个县市选择 2000 年左右及 2014 年左右的两组数据进行土地利用监督分类，取两组地表水体分类结果的公共部分作为该县市的地表水体分布最终数据(图 2A)，而基于面积信息的面状矢量水体比单纯基于长度的线状矢量水体包含更多水要素信息，能够更加准确地评价区域地表水体的空间分布格局。经过图层叠置分析等处理后，发现最终的地表水体几乎都由河流、湖泊及少部分水库、鱼塘构成，而研究区内的水库、鱼塘等非自然水体类型也与其附近的河流、湖泊等自然水体类型密切相关。为更加客观及全面地评价研究区不同区域间土壤与地表水体空间分布格局的交互关系，将研究样区基于地理邻近原则、经度邻近原则、纬度邻近原则分别划分为面积相等的 10 个分区域，并分别计算 3 种不同的分区域分割方式下分区域内的地表水体空间分布多样性、土属构成组分多样性和土壤亚类构成组分多样性，并评价 3 种多样性之间的关系，即地理邻近分割原则下的图 2B，经度邻近分割原则下的图 2C，纬度邻近分割原则下的图 2D。选取研究区内的代表性土类为例，计算分区域土类空间分布多样性，结合分区域地表水体空间分布多样性的计算结果和代表性土类的理化性

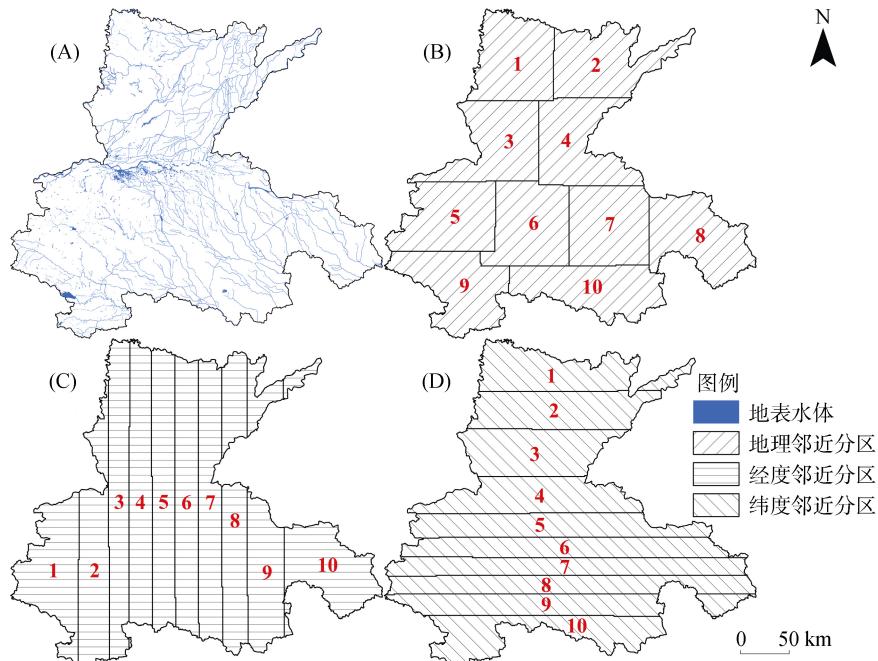


图2 研究区地表水体及分区域分布
Fig. 2 Distribution of surface water and subregion

质,对代表性土类和地表水体之间的地理分布交互关系进行初步探索。

2 结果与分析

2.1 土壤分类单元数目与土壤构成组分多样性的相关性

计算并统计了3种分区域分割方式下,各分区域内1 km网格尺度下的地表水体空间分布多样性、土壤亚类个数及其构成组分多样性、土属个数及其构成组分多样性(表1),在土壤图数据分析中删除了居民点、河中沙丘、水系等非土壤类斑块。

对上述统计数据进行一元线性回归分析发现,在地理邻近和经度邻近分区域分割方式下,土壤亚类个数与土壤亚类构成组分多样性、土属个数与土属构成组分多样性之间都存在明显的正相关关系(图3A、图3B、图4A、图4B),但在纬度邻近分区域分割方式下,两组数据却并不存在明显联系(图3C、图4C)。对研究结果进行F检验,在95%的置信水平下,图3A、图3B、图4A、图4B中的F值分别为0.001 391、0.000 074、0.031 923、0.003 967,均小于0.05,回归分析结果有效;图3C、图4C中的F值分别为0.883 052、0.749 711,均大于0.05,回归分析结果无效。地理邻近和经度邻近分区域分割方式下的此种数据表现与前期研究中的相关结论^[24]相一致,而纬度邻近分区下的数据表现不一致。在此做出如下结论:

随着区域内土壤分类单元数量的增加,区域内的土壤构成一般也将会变得更加均匀,但这一现象在不同纬度地区的横向对比中无明显表现。

2.2 地表水体空间分布多样性与土壤分类单元数目的相关性

研究发现,在地理邻近和经度邻近分区域分割方式下,地表水体空间分布多样性与土壤亚类个数、土属个数之间都存在一定的负相关关系(图5A、图5B、图6A、图6B),但在纬度邻近分区域分割方式下,两组数据却并不存在明显联系(图5C、图6C)。对研究结果进行F检验,在95%的置信水平下,图5A、图5B、图6A、图6B中的F值分别为0.162 385、0.032 202、0.086 470、0.053 044,少部分回归分析结果有效;图5C、图6C的F值分别为0.929 129、0.442 140,回归分析结果无效。上述研究发现与前期研究中的相关结论^[24]存在明显区别,前期研究在小尺度(5 000 km²左右)研究区数据支持下发现地表水体的离散性分布特征与区域土壤分类单元数目之间存在更加明显的负相关关系。在此做出如下结论:区域地表水体更加离散的空间分布特征会造成区域内土壤分类单元数目的减少,但这种现象随着研究区面积的增加将会逐渐弱化,也即在大尺度研究区内,除水要素以外的其他成土因素将对区域土壤构成产生主要影响,但在小尺度研究区内,生物、母质、地形、时间、内动力地质作用以及人类活动等成土因素相对固定,因此

表 1 3 种分区域分割方式下的地表水体信息及土壤信息
Table 1 Information of surface water and soil under three subregion methods

分区域分割方式	分区编号	网格个数	地表水体空间分布多样性	土壤亚类个数	土壤亚类构成组分多样性	土属个数	土属构成组分多样性
地理邻近	1	6 830	0.766	20	0.758	45	0.718
	2	6 911	0.811	11	0.466	22	0.788
	3	6 777	0.787	21	0.653	39	0.780
	4	6 785	0.795	10	0.405	23	0.698
	5	6 749	0.670	23	0.665	52	0.797
	6	6 657	0.784	11	0.489	24	0.681
	7	6 662	0.741	8	0.143	15	0.612
	8	6 910	0.769	8	0.275	16	0.692
	9	6 867	0.693	19	0.812	43	0.804
	10	6 849	0.759	6	0.401	17	0.719
经度邻近	1	6 924	0.669	26	0.704	56	0.827
	2	6 814	0.737	25	0.755	62	0.787
	3	6 756	0.753	25	0.800	58	0.805
	4	6 718	0.750	22	0.680	46	0.734
	5	6 702	0.793	16	0.645	37	0.783
	6	6 701	0.799	13	0.329	25	0.671
	7	6 734	0.789	11	0.268	22	0.631
	8	6 760	0.791	10	0.400	24	0.736
	9	6 872	0.746	10	0.334	21	0.726
	10	7 016	0.767	10	0.266	19	0.678
纬度邻近	1	6 991	0.786	20	0.681	39	0.807
	2	6 751	0.796	22	0.704	47	0.809
	3	6 757	0.781	22	0.530	41	0.728
	4	6 801	0.804	16	0.534	31	0.701
	5	6 750	0.728	23	0.521	48	0.691
	6	6 725	0.761	21	0.458	45	0.692
	7	6 706	0.724	20	0.514	43	0.723
	8	6 728	0.756	14	0.533	34	0.719
	9	6 791	0.775	18	0.534	37	0.722
	10	6 997	0.699	17	0.641	39	0.761

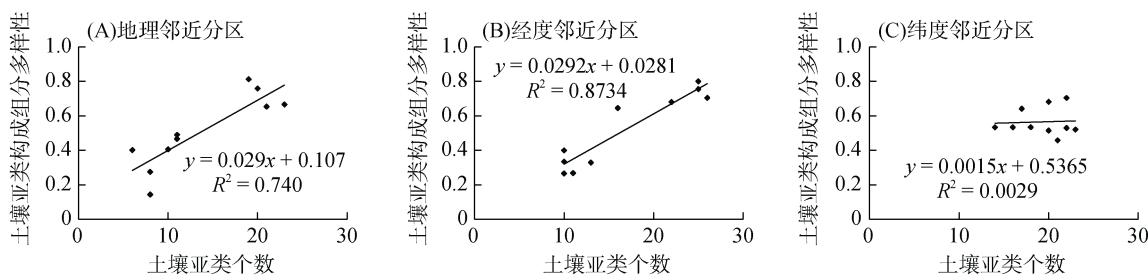


图 3 土壤亚类个数与其构成组分多样性的关系
Fig. 3 Relationships between soil subgroup amount and its constituent diversity

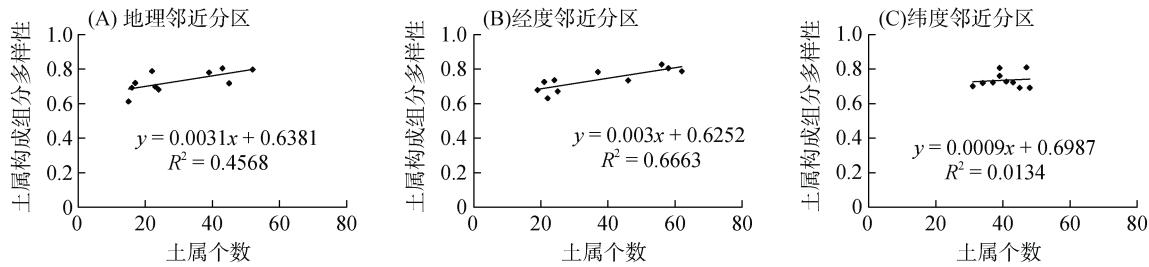


图4 土属个数与其构成组分多样性的关系
Fig. 4 Relationships between soil family amount and its constituent diversity

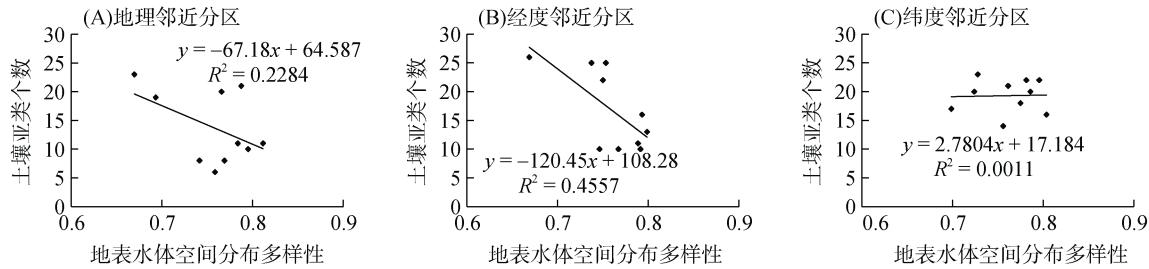


图5 地表水体空间分布多样性与土壤亚类个数的关系
Fig. 5 Relationships between surface water spatial distribution diversity and soil subgroup amount

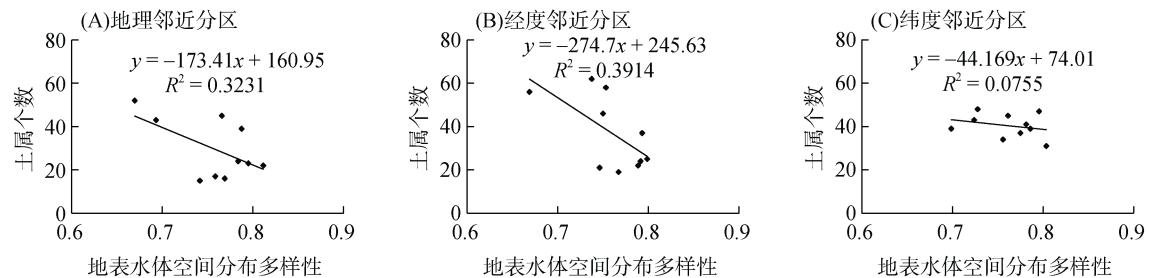


图6 地表水体空间分布多样性与土属个数的关系
Fig. 6 Relationships between surface water spatial distribution diversity and soil family amount

小尺度研究区内的水要素分布特征将对区域土壤构成产生主要影响。

2.3 代表性土类分布对区域地表水体空间分布格局的影响

在以往常规的成土因素相关分析中,一般均着眼于气候、生物、母质、地形、时间、内动力地质作用以及人类活动等因素对土壤形成的作用分析,而从土壤形成角度探讨土壤分布现状与这些成土因素交互影响的相关报道较少出现。上一章节的研究内容主要分析区域地表水体的空间分布特征对区域内土壤构成混乱程度的整体影响,本节尝试分析单一土壤类型与区域地表水体空间分布的交互影响。

当土壤分类级别由土属变为土类时,不同土壤类别间的理化性质具有更大的区别,为深入探索区域土壤分布与地表水体空间分布格局之间存在的客观联系,基于前期研究的相关方法及理论,对研究区内的土壤分类单元(以土类为例)进行筛选,选择潮土和褐

土这两种土类作为研究区的代表性土壤类型进行后续研究,这两种土类同时满足面积最大(分别占研究区土壤总面积的 65.08% 和 19.93%)和空间分布最广泛(1 km 网格尺度下的土壤空间分布多样性均大于 0.8)的代表性土壤类型选取原则(表 2、图 7)。

潮土是一种受地下潜水影响和作用的半水成土壤,是由潴育化过程和旱耕熟化影响的腐殖质积累过程发育而形成的。潮土分布地区地形平坦,地下水埋深较浅,水热资源较为丰富,一般多具有比较悠久的地区农业历史。潮土是河南省面积最大、分布最广的一个土类^[25]。计算并统计了 3 种分区域分割方式下,各分区域内 1 km 网格尺度下的潮土、褐土空间分布多样性(表 3),结合各分区域分割方式下的地表水体空间分布多样性数据(表 1),研究发现,随着区域内潮土空间分布多样性的升高,地表水体的空间分布离散性也有升高的趋势,这一现象在地理邻近和经度邻近分区域分割方式下表现明显(图 8A、图 8B),但在

表 2 研究区土类信息统计
Table 2 Statistics of soil groups in research area

土类名称	总面积(km ²)	空间分布多样性	土类名称	总面积(km ²)	空间分布多样性
潮土	41848.72	0.960	砂姜黑土	3170.27	0.739
粗骨土	1616.85	0.691	石质土	1718.24	0.698
风砂土	1043.74	0.672	水稻土	47.79	0.389
褐土	12812.68	0.860	新积土	75.96	0.431
红粘土	230.52	0.533	盐土	24.59	0.334
黄褐土	1390.24	0.660	紫色土	56.96	0.413
碱土	95.17	0.465	棕壤	168.74	0.501

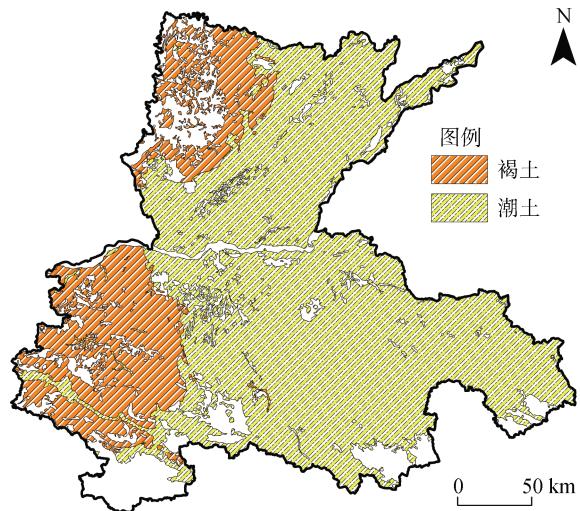


图 7 代表性土类分布
Fig. 7 Distribution of representative soil groups

纬度邻近分区方式下无表现(图 8C)。对上述研究结果进行 F 检验，在 95% 的置信水平下，图 8A、图 8B、图 8C 中的 F 值分别为 0.017 086、0.000 727、0.486 264，地理邻近和经度邻近分区域分割方式下的回归分析结果有效，纬度邻近分区方式下无效。研究认为形成该数据现象的原因有两个：一是区域地表水体分布对土壤形成的影响，即潮土的成土条件之一是区域性的潮湿水分状况，因此分区域内高分布离散性的地表水体为潮土的形成提供了有利条件；二是发挥潮土生产潜力的前提是发展灌溉，即研究区内潮土区广阔的适种性要求加强农田水利设施建设，而潮土区多为平原地形也为农田水利设施的建设提供了客观上的有利条件，因此潮土分布离散性的增强往往给区域内地表水体分布离散性的增强提供了反作用力。

表 3 分区域分割方式下代表性土类的空间分布多样性统计
Table 3 Statistics of spatial distribution diversities of representative soil groups in subregions

分区编号	潮土			褐土		
	地理邻近分区	经度邻近分区	纬度邻近分区	地理邻近分区	经度邻近分区	纬度邻近分区
1	0.767	0.722	0.916	0.939	0.956	0.883
2	0.987	0.804	0.936	0.539	0.936	0.831
3	0.953	0.891	0.975	0.824	0.890	0.758
4	0.991	0.934	0.967	0.000	0.824	0.764
5	0.713	0.962	0.954	0.977	0.830	0.844
6	0.986	0.991	0.962	0.696	0.643	0.843
7	0.997	0.994	0.959	0.000	0.000	0.842
8	0.989	0.993	0.960	0.264	0.000	0.845
9	0.827	0.983	0.944	0.900	0.000	0.827
10	0.971	0.983	0.913	0.265	0.264	0.688

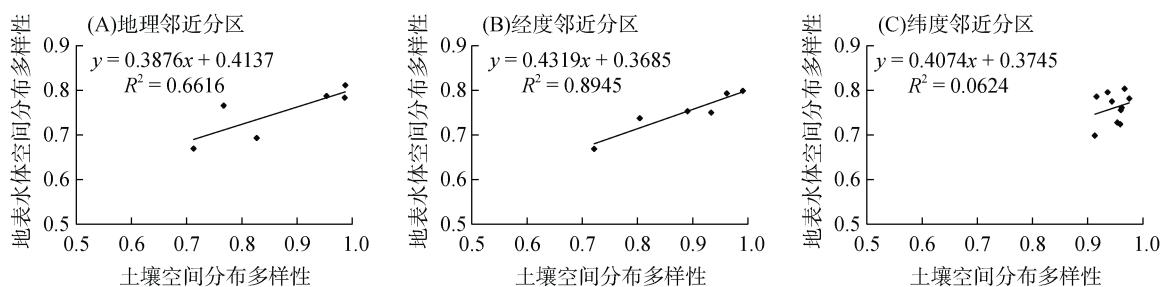


图 8 代表性土壤(潮土)空间分布多样性与地表水体空间分布多样性的关系
Fig. 8 Relationships between spatial distribution diversity of representative soil group (Ochri-Aquic Cambosol) and surface water

褐土是河南省仅次于潮土的第二大土类, 是在暖温带半湿润季风气候、干旱森林和灌木草原植被下, 经过黏化过程和钙积过程发育而成的半淋溶性土壤, 褐土区地下水位多在 10 m 以下, 有的达数十米, 因此水要素一般不参加褐土的成土过程^[25]。由于褐土在研究区内的分布特征所限, 在某些分区内无褐土分布(分区内褐土面积为 0)或仅有极少量分布(分区内褐土面积占研究区褐土总面积的比例低于 0.1%), 为客观分析褐土的空间分布对地表水体空间分布造成的影响, 在回归分析中删除了地理邻近分区域分割方式下的 4、7、8、10 和经度邻近分区域分割方式下的 7、8、9、10 号分区数据点。研究发现, 在地理邻近和经度邻近分区域分割方式下, 随着区域内褐土空间分布多样性

的升高, 地表水体空间分布离散性有降低趋势(图 9A、图 9B), 但在纬度邻近分区方式下该数据现象无表现(图 9C)。对上述研究结果进行 F 检验, 在 95% 的置信水平下, 图 9A、图 9B、图 9C 中的 F 值分别为 0.074 677、0.072 122、0.446 920, 3 种分区方式下的回归分析结果均无效, 但地理邻近和经度邻近分区域分割方式下的 F 值很接近 0.05, 这主要是由于删除无效数据点以后造成数据点总数过少引起的, 但图 9A、图 9B 的回归方程仍具有一定分析价值。后续研究中, 将单独对褐土的主要分布区域进行分区域分析, 应该能得到更加准确的拟合方程。本研究认为, 由于水要素一般不参与褐土的成土过程, 因此褐土与地表水体之间在空间分布格局上存在一定的负相关变化关系。

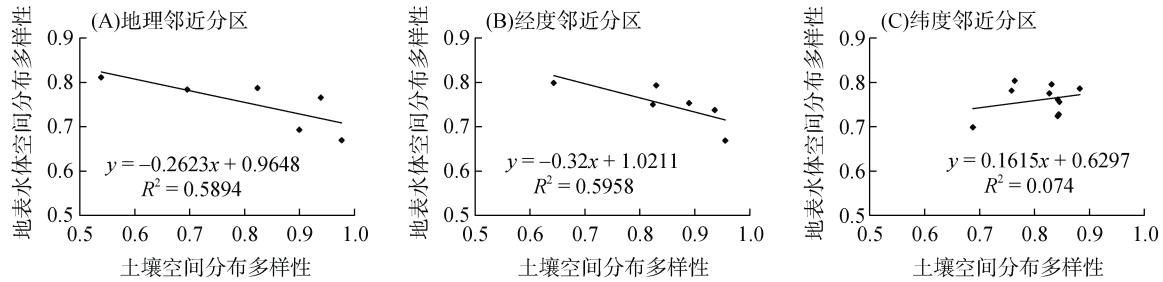


图 9 代表性土壤(褐土)空间分布多样性与地表水体空间分布多样性的关系

Fig. 9 Relationships between spatial distribution diversity of representative soil group (Hapl-Ustic Argosol) and surface water

本节研究结果表明, 改良的土壤多样性计量方法可以应用于某一具体土壤类型的空间分布格局与水要素空间分布格局的交互关系研究, 而且这种定量化的分析方法不仅适用于潮土这类与水要素存在密切联系的土壤类型, 同时还适用于褐土这类与水要素没有太大联系的土壤类型。

3 结论

1) 河南省最具代表性的土类——潮土的空间分布格局与区域地表水体的空间分布格局存在密切联系, 两者的空间分布离散性之间存在较为明显的正相关关系, 一元线性回归分析中的判定系数 R^2 达到 0.5 以上; 而另一代表性土类——褐土的空间分布格局与区域地表水体的空间分布格局之间却表现出较为明显的负相关变化关系, 判定系数 R^2 也达到 0.5 以上。上述数据现象与水要素在两种土壤类型成土过程中所起的重要程度密切相关。

2) 在分区域研究中, 地理邻近和经度邻近分区域分割方式下的数据结果表现相近, 但其均与纬度邻近分区的数据结果不一致。鉴于地理邻近分区理念与“相邻相近”的地理学第一定律更加贴合, 在后续研

究中将主要使用地理邻近分区方式探索不同区域水、土资源间的交互关系。

3) 土壤和地表水体空间分布格局之间的交互关系在大尺度和小尺度研究区中存在不同表现, 从水、土资源的地理空间分布角度来看, 水要素作为土壤形成过程中的必要环节, 在小尺度区域中, 由于生物、母质等其他成土因素发生突变的概率较小, 因此水要素对土壤形成的影响占比较大; 但在大尺度区域中, 相比于水要素, 其他成土因素一般存在较大的变化, 因此其他成土因素对土壤形成的影响更加重要。

4) 基于资源空间分布离散性分析的土壤多样性计量方法及理论除了能够定量化描述区域地表水体空间分布对区域内土壤丰富度指数的影响, 还能有效地应用于某个具体土壤类型与地表水要素空间分布格局的交互关系研究, 这在本研究中得到有效证明。在未来相关研究中, 将首先考虑研究区尺度, 即研究区面积大小对研究结论的影响, 另外考虑尝试分析不同地形、母质等条件下水、土资源空间分布格局交互性的不同体现。同时, 本研究的相关研究理念及方法也为其他资源类型的空间分布格局评价及交互关系研究提供了新的思路。

参考文献：

- [1] 王志强, 黄国勤, 赵其国. 新常态下我国轮作休耕的内涵、意义及实施要点简析[J]. 土壤, 2017, 49(4): 651–657.
- [2] 张凤荣. 土壤地理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 1–10.
- [3] 许兴斌, 王勇辉, 姚俊强. 艾比湖流域气候变化及对地表水资源的影响[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 121–126.
- [4] Li L, Shen H Y, Dai S, et al. Response of water resources to climate change and its future trend in the source region of the Yangtze River[J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(2): 208–218.
- [5] Ibáñez J J, Zinck J A, Dazzi C. Soil geography and diversity of the European biogeographical regions[J]. Geoderma, 2013, 192: 142–153.
- [6] Fajardo M P, McBratney A B, Minasny B. Measuring functional pedodiversity using spectroscopic information[J]. CATENA, 2017, 152: 103–114.
- [7] Fu T G, Han L P, Gao H, et al. Pedodiversity and its controlling factors in mountain regions—A case study of Taihang Mountain, China[J]. Geoderma, 2018, 310: 230–237.
- [8] Samsonova V P, Krotov D G, Voronin V A. Pedodiversity on soil maps at the district level[J]. Eurasian Soil Science, 2019, 52(6): 610–618.
- [9] 任圆圆, 张学雷. 河南省多级地貌特征及与土壤多样性的关系[J]. 土壤, 2019, 51(1): 142–151.
- [10] Ibáñez J J, Caniego J, García-Álvarez A. Nested subset analysis and taxa-range size distributions of pedological assemblages: Implications for biodiversity studies[J]. Ecological Modelling, 2005, 182(3/4): 239–256.
- [11] 任东风, 尤静静, 尤明英, 等. 基于灰色理论与回归模型的土壤类型预测研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 520–524.
- [12] Amundson R, Guo Y, Gong P. Soil diversity and land use in the United States[J]. Ecosystems, 2003, 6(5): 470–482.
- [13] Yabuki T, Matsumura Y, Nakatani Y. Evaluation of pedodiversity and land use diversity in terms of the Shannon entropy [EB/OL]. <http://cdsweb.cern.ch/record/1178038>. 2009-05-19.
- [14] Duan J L, Zhang X L. Correlative comparison of pedodiversity and land use diversity between case areas from the developed east and less developed central China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(6): 1101–1116.
- [15] 张亮亮, 齐雁冰, 刘姣姣, 等. 西安市土壤与土地利用多样性及其关联分析[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1268–1274.
- [16] Ibáñez J J, Krasilnikov P V, Saldaña A. REVIEW: 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(6): 1267–1277.
- [17] 张学雷, 陈杰, 檀满枝, 等. 土壤多样性理论方法的新发展与应用[J]. 地球科学进展, 2003, 18(3): 374–379.
- [18] 张学雷, 陈杰, 张甘霖. 海南岛不同地形上土壤性质的多样性分析[J]. 地理学报, 2003, 58(6): 839–844.
- [19] 段金龙, 张学雷. 水土资源分布的多样性格局与关联性分析[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 2017.
- [20] 任圆圆, 张学雷. 从土壤多样性到地多样性的研究进展[J]. 土壤, 2018, 50(2): 225–230.
- [21] 李笑莹, 张学雷, 任圆圆. 河南省土壤及地形与耕地多样性格局的特征[J]. 土壤, 2019, 51(4): 775–785.
- [22] 任圆圆, 张学雷, 李笑莹, 等. 河南省成土母质与土壤空间分布多样性的特征[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1309–1320.
- [23] 李笑莹, 张学雷, 任圆圆. 地形及土壤多样性与耕地动态变化的相关分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(11): 1755–1766.
- [24] 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.
- [25] 魏克循. 河南土壤地理[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1995: 239, 323.