

艾比湖流域土壤有机质与土壤因子 响应关系的空间非平稳性分析

王合玲^{1,2}, 张辉国³, 吕光辉²

(1. 新疆财经大学 应用数学学院, 乌鲁木齐 830012; 2. 新疆大学 绿洲生态重点实验室,
乌鲁木齐 830046; 3. 新疆大学 数学与系统科学学院, 乌鲁木齐 830046)

摘要:为了研究新疆艾比湖流域土壤有机质(SOM)与土壤因子响应关系的空间非平稳性,文章应用地理加权回归模型(GWR)分析了2009年艾比湖流域49个样点1—120 cm土壤层有机质与土壤酸碱性、电导率和重金属含量之间关系的空间变异特征。研究结果表明:在平均意义下,土壤酸碱性 and 电导率对SOM含量具有反向影响,而重金属含量的影响是正向的,但是在流域的不同区域以及不同深度土壤层间,各土壤因子对SOM含量的影响空间差异显著、具有非平稳性,流域的东西两端及60—120 cm土壤层的非平稳性尤为显著。模型的残差分析结果证实GWR拟合效果较好。

关键词:土壤有机质; 土壤因子; 空间非平稳性; 地理加权回归模型; 艾比湖流域

中图分类号:S159.2; Q142.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)02-0224-05

Analysis of Spatial Non-stationary Relationships Between Soil Organic Matter and Soil Factors in Ebinur Lake Basin

WANG Heling^{1,2}, ZHANG Huiguo³, LÜ Guanghui²

(1. College of Applied Mathematics, Xinjiang University of Finance and Economics,
Urumqi 830012, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University,
Urumqi 830046, China; 3. Institute of Mathematics and System Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: In order to study the spatial non-stationary relationships between soil organic matter (SOM) and soil factors in Ebinur Lake Basin, according to 49 samples of 1—120 cm soil layer from the Ebinur Lake Basin in 2009, Geographically Weighted Regression (GWR) was employed to analyze spatial heterogeneity regression relationships between SOM and soil factors including soil pH, electrical conductivity and heavy metal contents. The results show that, in an average sense, soil pH and electrical conductivity have the reverse impact on the SOM content, and the impact of the heavy metal contents is positive. However, the regression relationships between SOM contents and each soil factor are significantly spatial non-stationary and vary with the region and soil depth in the basin. Specifically, the spatial non-stationarity is more significant in the eastern and western regions of the basin and the 60—120 cm soil layer. The residual diagnosis indicates that the GWR model is effective.

Keywords: soil organic matter; soil factors; spatial non-stationarity, geographically weighted regression; Ebinur Lake Basin

土壤是具有高度变异性的时空连续体,土壤有机质(SOM)是土壤的重要组成物质,对改善土壤物理、化学性质以及植物的生长起着重要的作用。揭示土

壤有机质变异规律是了解土壤肥力状况的重要内容,也是评估土壤固碳能力和实现土壤可持续利用的前提。SOM与诸多土壤因子的空间分布特征在国内外

收稿日期:2015-04-02

修回日期:2015-05-12

资助项目:国家自然科学基金资助项目(41261087);教育部人文社会科学青年研究项目(12XJJC91001);新疆大学博士启动资助项目(BS130103);新疆财经大学博士项目基金(2014BS003)

第一作者:王合玲(1975—),女,新疆乌鲁木齐人,博士,副教授,硕导,研究方向为空间统计学及区域生态学与生态模型。E-mail: wang_heling@163.com

被广泛研究^[1-10],如 SOM 与土壤酸碱性(pH 值)^[11], SOM 与土壤全氮和盐分等^[12],杨奇勇和杨劲松^[13]、王淑英等^[14]分析了不同尺度条件土壤有机质的空间分布。但是,上述研究主要侧重 SOM 和土壤理化因子等数量指标的空间变异状况,而缺乏各土壤因子与 SOM 含量相互影响的进一步研究,特别是对其响应关系在空间区域和土壤不同剖面深度的空间非平稳特征缺乏定量分析。地理加权回归模型^[15-17](Geographically Weighted Regression, GWR)将数据空间信息有效纳入回归分析框架,是探索变量响应关系空间非平稳(spatial non-stationarity)特征的有效工具。本文以艾比湖流域实际采样数据为基础,运用地理加权回归模型(GWR)定量地分析和推断了土壤的 pH 值、电导率和重金属含量等土壤因子对 SOM 含量的影响关系及其空间非平稳性,分析结果将有利于提高对典型干旱区封闭性流域土壤侵蚀与退化过程中土壤生态系统演替的认识,同时也为艾比湖流域土壤资源的合理利用和可持续发展以及生态保护和植被恢复提供理论基础和决策依据。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

新疆艾比湖流域位于 43°38′—45°52′N, 79°53′—85°02′E, 地处欧亚大陆腹地、天山西段北麓、准噶尔盆地西南部,其北、西、南三面被高山阻隔,此封闭性流域地跨博尔塔拉蒙古自治州的博乐市、温泉县和精河县,塔城地区的乌苏和托里县南部,伊犁州直属的奎屯市和克拉玛依的独山子区,面积 50 621 km²。属干燥少雨多风的典型北温带大陆性干旱气候^[18-21]。艾比湖流域以农牧业为主,长期的水土流失和其他各种人为破坏,直接威胁该流域农牧业的可持续发展。

1.2 土壤样品采集与测定

为了系统研究艾比湖流域内土壤有机质空间分布特征及其影响因素的响应关系,2009 年在艾比湖流域布设 49 个土壤剖面发育完整、层次清晰和无人侵体的采样点。每个样点土壤剖面按自下而上分层次采样以确保不同深度土壤样品无相互混杂污染,采样总深度为 120 cm,每 20 cm 土壤作为一个取样层,且每层土壤样品不少于 2.5 kg。另外,为了降低人为因素的影响,所布设样点距离公路及铁路均超过 300 m 且尽量避开耕地。土壤样品经风干、研磨和过 100 目筛(0.15 mm 孔径)后备用,利用重铬酸钾—硫酸溶液直接加热消解法测定土壤有机质含量、运用 pH 计法对土壤酸碱性进行测定、通过电导仪法测定土壤电导率、由电感耦合等离子体原子发射光谱法测

定 8 种重金属元素。

1.3 数据处理与分析方法

生态科学和环境科学的试验数据通常都来自于特定的地理位置,蕴含地理位置的信息,因而这种具有空间位置属性的数据称为空间数据。根据 Tobler 地理学第一定律任何事物与其他事物都是空间相关的,距离越近的事物之间的空间相关性越大。他们之间的空间相关性会导致回归关系的空间非平稳性或回归关系的空间异质性(spatial heterogeneity)。线性回归模型通常忽略了数据的空间位置属性,只反映平均意义下因变量与自变量的相关关系,而不能有效反映回归关系的空间非平稳性的特征。而近些年出现的一种新的空间局部回归技术——地理加权回归模型(Geographically Weighted Regression, GWR)是将数据的地理位置引入到回归系数之中,基于回归系数函数的估计探索和分析回归关系的空间非平稳性(spatial nonstationarity)的特征。

设 Y 为因变量, X_1, X_2, \dots, X_p 为自变量, $(Y_i, X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ip})$ 为因变量与自变量在地理位置 (u_i, v_i) 处的观测值 $i = 1, 2, \dots, n$, 则地理加权回归模型为:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i)X_{i1} + \dots + \beta_p(u_i, v_i)X_{ip} + \epsilon_i$$

式中: $\beta_j(u, v)$ ($j = 0, 1, \dots, p$)——空间地理位置 (u, v) 的未知函数; ϵ_i ($i = 1, 2, \dots, n$)——独立同分布的误差项且 $E(\epsilon_i) = 0, \text{var}(\epsilon_i) = \sigma^2$

GWR 模型中的回归函数可由非参数核估计方法得到,本文数据统计分析和模型计算使用 R 软件(<http://www.r-project.org/>)完成,地图由 Arc-View GIS 3.3 和 Surfer 9 绘制。

2 结果与分析

为了将回归系数的空间非平稳性纳入回归模型,假定其中 (u_i, v_i) 表示第 i 个样本点的空间坐标,土壤有机质含量与它的空间位置、土壤酸碱性、电导率和重金属含量满足地理加权回归模型:

$$\text{土壤有机质含量} = \beta_0(u, v) + \beta_1(u, v)\text{土壤酸碱性} + \beta_2(u, v)\text{土壤电导率} + \beta_3(u, v)\text{土壤重金属含量} + \epsilon$$

依据艾比湖流域土壤采样数据,估计和检验上述 GWR 模型,即可评估艾比湖流域土壤有机质与土壤因子的空间非平稳性。

2.1 土壤有机质与土壤因子地理加权回归模型的估计和检验

由表 1 可知,深层 81—100 cm 土壤酸碱性对 SOM 的影响最大为 3.16,均值都为负值,说明从总体上看随着土壤酸碱性的增加 SOM 含量都在减少,

并且在深层 101—120 cm 土壤酸碱性对 SOM 含量反向影响最大,其值为 15.01;土壤电导率对 SOM 含量影响最大的在 41—60 cm,其值为 2.69,除了在 81—100 cm 的均值为正值外,其他五层均值均为负值,说明从平均意义上看随着土壤电导率的增加

SOM 含量都在减少;土壤重金属含量在 21—40 cm 对 SOM 含量影响最大为 5.48,除了在 61—80 cm 的均值为负值外,其他五层的均值都为正值,说明从平均意义上看随着土壤重金属含量的增加 SOM 含量都在增加。

表 1 艾比湖流域土壤有机质含量与土壤因子 GWR 模型系数函数估计值统计分析

回归系数	统计量	土层深度/cm					
		1—20	21—40	41—60	61—80	81—100	101—120
$\hat{\beta}_1(u,v)$	最小值	−2.93	−3.42	−3.45	−5.72	−0.57	−15.01
	1/4 分位数	−2.62	−1.26	−1.34	−0.7	−0.39	0.28
	中位数	−1.89	−0.97	−1.14	−0.65	−0.36	0.42
	均值	−1.51	−1.00	−1.34	−0.95	−0.13	−0.21
	3/4 分位数	−0.53	−0.51	−1.03	−0.55	−0.17	0.56
	最大值	0.90	−0.09	−0.63	−0.24	3.16	1.24
$\hat{\beta}_2(u,v)$	最小值	−1.40	−0.92	−0.51	−0.51	−0.20	−1.00
	1/4 分位数	−0.83	−0.24	−0.27	−0.13	0.00	−0.13
	中位数	−0.75	−0.13	−0.07	−0.06	0.03	−0.03
	均值	−0.68	−0.19	−0.04	−0.03	0.06	−0.12
	3/4 分位数	−0.62	0.03	0.10	0.06	0.03	0.00
	最大值	0.46	0.10	2.69	2.20	2.56	0.03
$\hat{\beta}_3(u,v) \times 10^3$	最小值	−1.79	−0.49	−4.23	−3.64	−1.41	−2.96
	1/4 分位数	−0.33	1.08	0.21	−0.37	0.24	0.21
	中位数	0.34	2.45	0.57	0.20	0.49	0.30
	均值	0.11	2.42	0.49	−0.14	0.56	0.45
	3/4 分位数	0.73	3.56	1.13	0.58	0.64	0.59
	最大值	1.01	5.48	1.91	1.12	2.58	2.25

附图 4 显示在表层 1—20 cm 中 SOM 含量与土壤因子的 GWR 模型的系数空间分布不一致,总体上看土壤因子对 SOM 含量的影响分布是西高东低;土壤的酸碱性在艾比湖区对 SOM 质含量的正向影响最大,在乌苏市对 SOM 含量的反向影响最大;土壤电导率在艾比湖流域的温泉县对 SOM 含量的正向影响最大,而在克拉玛依和奎屯市反向影响最大;土壤的重金属在流域中部影响最大。

在 21—40 cm 土壤的酸碱性、电导率和重金属含量除了艾比湖区外,所有其他区域 SOM 含量的影响都是反向的,在流域东部的奎屯市,土壤的酸碱性和电导率对 SOM 含量的反向影响最大;土壤重金属含量在流域西部的温泉县对 SOM 含量的反向影响最大。因此,土壤因子对 SOM 含量的影响都比较大,尤其局部的变化更明显。

由附图 5 知,土壤各因子对 SOM 含量的影响在 41—80 cm 比较相似,土壤的酸碱性总体上对 SOM 含量的影响都是反向,即随着土壤的酸碱性的增加 SOM 含量的增加;在流域西部的温泉县土壤的酸碱性影响最大,而在流域东部土壤的酸碱性反向影响最

大;总体上土壤电导率对 SOM 含量的影响的空间分布是西高东低,土壤重金属是西低东高;在流域的西部温泉县土壤重金属反向影响最大。

由附图 6 知,在 81—100 cm 土壤的酸碱性和电导率在流域西部温泉县对 SOM 含量的影响较显著,而在流域东部基本上都是反向的;土壤的重金属在流域两端对 SOM 含量的影响很大,而在中部影响较小,尤其在流域西部温泉县反向影响最大,在流域东部正向影响很大。

在 101—120 cm 土壤各因子在流域西部温泉县,土壤重金属反向影响最大,土壤的酸碱性和电导率由西向东增大,除了局部几个区域外,总体土壤的酸碱性和电导率都是反向的;而土壤重金属除了流域西部的温泉县外,总体都是正向,尤其在流域东部的奎屯市和克拉玛依,土壤重金属影响最大。

通过上述分析可得 SOM 含量与土壤因子的 GWR 模型系数的空间分布很不均匀,说明模型更能够体现局部的空间特征,而且能够更加详述土壤各因子在各土壤层的空间变异性 and 异质性。

由表 2 可知,艾比湖流域 SOM 与土壤因子 GWR 模型 F 的检验,除了表层 1—20 cm 其他五层都是显

著,尤其在 61—120 cm 较显著;土壤的酸碱性和电导率在 1—60 cm 不显著,在 61—120 cm 显著,尤其在 61—80 cm 和 101—120 cm 较显著的;土壤的电导率在 81—120 cm 较显著的,在 41—60 cm 显著,其他三层土壤电导率都不显著;土壤重金属在各层都不显著。

表 2 艾比湖流域 SOM 含量与土壤因子 GWR 模型以及回归系数非平稳性检验

参 数	土壤深度/cm						
	1—20	21—40	41—60	61—80	81—100	101—120	
模型 F 检验	0.75	1.72*	1.56*	1.86**	2.06**	2.14**	
$\hat{\beta}_1(u,v)$ F 检验	1.00	1.18	0.59	3.84**	1.85*	7.10**	
$\hat{\beta}_2(u,v)$ F 检验	0.31	1.18	2.10*	1.64	4.04**	7.62**	
$\hat{\beta}_3(u,v)$ F 检验	0.24	1.37	0.72	0.73	1.58	0.92	
决定系数 R^2	0.31	0.53	0.47	0.66	0.70	0.74	
回归残差	最小值	−3.11	−2.32	−2.39	−1.67	−3.21	−3.26
	1/4 分位数	−1.19	−0.64	−0.99	−0.6	−0.55	−0.55
	中位数	−0.31	−0.15	−0.29	−0.16	0.02	−0.23
	均值	−0.08	−0.02	−0.06	0.02	0.04	0.03
	3/4 分位数	0.16	0.31	0.44	0.56	0.48	0.58
	最大值	9.02	3.63	5.92	4.07	2.78	4.41

注: * $p<0.1$, ** $p<0.05$ 。

2.2 土壤有机质与土壤因子 GWR 模型的残差分析

由附图 7 可见拟合残差在 1—60 cm 主要差异分布在艾比湖区和乌苏市以及流域西端,其他区域几乎都为负值,说明残差是正负相间,差异最大在艾比湖区,主要由于湖区水分充足和表层土壤分解腐殖质和枯落物很充分导致有机质含量差异大。在 61—120 cm 为正值的主要分布在流域东西两端和艾比湖区,其他区域几乎都为负值,残差差异最大在流域西部的温泉县和博乐市。

通过以上分析可知:GWR 模型的残差分布不均匀,除了一部分区域残差比较大,其他大多数的残差比较小。

3 结 论

文章针对艾比湖流域土壤酸碱性和电导率和重金属含量等土壤因子与 SOM 含量之间的空间非平稳关系展开研究,建立了各土壤因子对有机质含量的地理加权回归模型,然后估计回归系数函数并检验其空间非平稳性,藉此分析了土壤因子与有机质含量响应关系的空间变化特征。

在平均意义下,土壤的酸碱性和电导率对土壤有机质的影响是反向的,而重金属含量对土壤有机质含量的影响是正向的。然而,由空间变系数函数在各层估计曲面来看,艾比湖流域各土壤因子对土壤有机质含量的影响程度在流域空间内不均衡,具有显著的空间非平稳性。具体地,土壤因子对土壤有机质含量的回归关系在

此外,表 2 显示表层 1—20 cm,41—80 cm 和深层 101—120 cm 的 GWR 模型的残差差异较大,而且在 1—60 cm 回归残差的均值为负,说明总体来看这三层回归残差是正负相间;而在 61—120 cm 为正,回归残差具有集聚的特征。

流域的东西两端变化剧烈,而在中部的艾比湖区较为平稳。此外,统计检验结果还表明土壤因子回归系数曲面的非平稳检验的显著程度在各土壤层之间差异很大,因而土壤因子与有机质含量的回归关系沿不同土壤剖面深度显著不同,土壤因子对土壤有机质含量的影响强度在浅层土壤(1—60 cm)变化较小,而在深层土壤(60—120 cm)变化较大。地理加权回归模型的残差分析表明数据拟合效果较好。上述研究有助于深化艾比湖流域土壤侵蚀与退化过程中土壤生态系统演替的认识,为流域内土壤资源的合理利用以及因地制宜地实施生态保护和植被恢复提供了决策依据。

参考文献:

[1] 黄元仿,周志宇,苑小勇,等. 干旱荒漠区土壤有机质空间变异特征[J]. 生态学报,2004,24(12):2776-2781.

[2] 王合玲,张辉国,秦璐,等. 新疆艾比湖流域土壤有机质的空间分布特征及其影响因素[J]. 生态学报,2012,32(16):4969-4980.

[3] 方睿红,常庆瑞. 关中平原台塬区土壤养分空间格局研究:以西安市长安区为例[J]. 水土保持研究,2011,18(6):141-145.

[4] 张忠启,于法展,李保杰,等. 江苏北部县域土壤有机质空间变异特征[J]. 水土保持研究,2012,19(5):219-222.

[5] 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主控因素分析[J]. 土壤学报,2013,50(1):1-11.

[6] 腊贵晓,顾怀胜,刘国顺,等. 喀斯特地区烟田土壤养分的空间变异特征[J]. 水土保持研究,2012,19(3):48-53.

- [7] Müller M, Alewell C, Hagedorn F. Effective retention of litter-derived dissolved organic carbon in organic layers [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(6): 1066-1074.
- [8] Mikhailova E A, Bryant R B, DeGloria S D, et al. Modelling soil organic matter dynamics after conversion of native grassland to long-term continuous fallow using the Century model [J]. *Ecol. Modelling*, 2000, 132(3): 247-257.
- [9] Huang Y H, Li Y L, Xiao Y, et al. Controls of litter quality on the carbon sink in soils through partitioning the products of decomposing litter in a forest succession series in South China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(7): 1170-1177.
- [10] Kalbitz K, Kaiser K. Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(1): 52-60.
- [11] Mishra T K, Banerjee S K. Spatial variability of soil pH and organic matter under *Shorea robusta* in lateritic region [J]. *Indian Journal of Forestry*, 1995, 18(2): 144-152.
- [12] Wright A L, Hons F M. Soil carbon and nitrogen storage in aggregates from different tillage and crop regimes [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(1): 141-147.
- [13] 杨奇勇, 杨劲松. 不同尺度下耕地土壤有机质和全氮的空间变异特征[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 100-104.
- [14] 王淑英, 路苹, 王建立, 等. 不同研究尺度下土壤有机质和全氮空间变异特征: 以北京市平谷区为例[J]. *生态学报*, 2008, 28(10): 4957-4964.
- [15] 王库. 基于地理权重回归模型的土壤有机质空间预测[J]. *土壤通报*, 2013, 44(1): 21-28.
- [16] 瞿明凯, 李卫东, 张传荣, 等. 地理加权回归及其在土壤和环境科学上的应用前景[J]. *土壤*, 2014, 46(1): 15-22.
- [17] 刘世梁, 刘琦, 王聪, 等. 基于地理加权回归的漫湾库区景观破碎化及影响因子分析[J]. *地理科学*, 2014, 32(7): 856-862.
- [18] 李艳红, 姜黎, 佟林. 新疆艾比湖流域生态环境空间分异特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(11): 59-62.
- [19] 吴敬禄, 刘建军, 王苏民. 近 1500 年来新疆艾比湖同位素记录的气候环境演化特征[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(5): 585-589.
- [20] 张辉国, 王合玲. 艾比湖流域土壤有机质垂直空间变异特征[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(5): 77-81.
- [21] 陈蜀江, 侯平, 李文华, 等. 新疆艾比湖湿地自然保护区综合科学考察[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2006.

(上接第 223 页)

- [8] Fan X, Ma Z, Yang Q, et al. Land use/land cover changes and regional climate over the Loess Plateau during 2001—2009. Part I: observational evidence[J]. *Climatic Change*, 2015, 129(3/4): 427-440.
- [9] 曾辉, 邵楠, 郭庆华. 珠江三角洲东部常平地区景观异质性研究[J]. *地理学报*, 1999, 54(3): 255-262.
- [10] 田义超, 任志远. 基于分形理论的黄土丘陵区土地利用研究: 以延安市宝塔区为例[J]. *地域研究与开发*, 2011, 30(6): 121-125.
- [11] 张荣天. 宁镇扬丘陵区土地利用空间结构的分形研究: 以镇江市为例[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(3): 98-10.
- [12] 李昭阳, 汤洁, 孙平安, 等. 松嫩平原西南部土地利用动态变化的分形研究[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2006, 36(2): 250-258.
- [13] 杨洋, 毕如田. 黄土高原典型地貌类型的土地利用分形特征[J]. *地理与地理信息科学*, 2011, 27(1): 101-104.
- [14] 阿如早, 杨持, 同丽嘎. 基于分形理论的沙漠化土地空间结构: 以内蒙古多伦县为例[J]. *地理研究*, 2010(2): 283-290.
- [15] 郅瑞卿, 刘富民. 基于分形理论的土地利用景观格局变化研究: 以镇赉县镇赉镇为例[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(2): 217-222.
- [16] 周锐, 苏海龙, 王新军, 等. CLUE-S 模型对村镇土地利用变化的模拟与精度评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(2): 174-180.
- [17] 杨海龙, 李迪强, 朵海瑞, 等. 梵净山国家级自然保护区植被分布与黔金丝猴生境选择[J]. *林业科学研究*, 2010(3): 393-398.
- [18] 邱雪超. 山岳型旅游景区创新性产品开发研究[D]. 成都: 西南财经大学, 2011.
- [19] 姚慧. 景观格局空间分析技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [20] 岳文泽, 金炯. 西北半干旱区城郊土地利用结构与分形模型研究: 以兰州市西固区为例[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(3): 249-256.
- [21] 李保杰, 顾和和, 纪亚洲. 矿区土地复垦景观格局变化和生态效应[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(3): 251-256.
- [22] Mandelbrot B B, Wheeler J A. The Fractal Geometry of Nature[J]. *American Journal of Physics*, 1983, 51(3): 286-287.
- [23] 徐建华, 艾南山. 西北干旱区景观要素镶嵌结构的分形研究: 以黑河流域为例[J]. *干旱区研究*, 2001, 18(1): 35-39.