

引用格式:葛畅,刘慧琳,聂超甲,等.土壤肥力及其影响因素的尺度效应:以北京市平谷区为例[J].资源科学,2019,41(4):753-765. [Ge C, Liu H L, Nie C J, et al. Scale effect of soil fertility spatial variability and its influencing factors[J]. Resources Science, 2019, 41(4): 753-765.] DOI: 10.18402/resci.2019.04.12

土壤肥力及其影响因素的尺度效应 ——以北京市平谷区为例

葛 畅¹,刘慧琳¹,聂超甲¹,沈 强²,张世文¹

(1. 安徽理工大学地球与环境学院,淮南 232001;2. 安徽理工大学测绘学院,淮南 232001)

摘 要:为揭示区域土壤肥力空间变异与影响因素及其随尺度变化的特征,本文以北京市平谷区为研究区,选择全区(L)、西部三镇(M)及三镇加密采样(S)三种尺度,以加权和法计算得到的土壤综合肥力指数(IFI)作为土壤肥力的表征,并结合变异函数与地理加权回归(GWR)等方法,分析IFI空间变异特征、各评价指标对土壤肥力贡献程度及其尺度效应,探究不同尺度土壤肥力影响因素作用差异。结果表明:不同尺度下土壤各指标差异明显,而三种尺度下IFI均在0.61左右,不同尺度间IFI变异度变化与其他各指标均不相同;IFI空间变异性具有明显的尺度效应,IFI块基比随着尺度的减小而增加,随机因素引起的变异在总变异中所占比重逐渐增大,L尺度表现为强空间相关性,M尺度表现为中等空间相关性,S尺度表现为弱空间相关性;不同尺度下不同土壤养分含量对IFI的贡献程度不同,L到M尺度各养分系数有所降低,M到S尺度各养分系数变化范围略有增加,单一指标对IFI的作用会受到其他指标的影响。土壤亚类、母质等因素对IFI的影响具有明显的尺度效应,随着尺度的降低各因素对IFI的影响作用总体上呈减弱的趋势。研究结果揭示了平谷区土壤肥力空间变异特征与影响因素及其随尺度的变化特征,为不同尺度下区域土壤肥力评价、空间格局分析等提供了技术支撑。

关键词:土壤综合肥力指数;影响因素;尺度效应;变异函数;地理加权回归;北京市平谷区

DOI: 10.18402/resci.2019.04.12

1 引言

土壤肥力是反映土壤肥沃性的一个重要指标,是衡量土壤能够持续提供作物生长所需的各种养分的能力^[1],因此土壤肥力的研究对提高土地利用效率、改善农田管理、提高作物产量与品质有着重要意义。

国内外已有很多关于土壤肥力的研究和应用,主要集中在土壤肥力指标选择与评价^[2-4],土壤肥力影响因素研究^[5,6]以及土壤肥力空间特征^[7];但目前研究主要集中于单一区域、单一尺度下,忽视了土壤肥力的空间异质性。土壤作为一个自然综合体,受各种自然和人为因素的影响,土壤性质存在空间

异质性。不同尺度下,土壤性质的影响因素不同^[8-10]。而且,目前关于土壤异质性研究主要针对一种或几种土壤指标,缺少关于土壤综合质量的尺度研究。如Hu等^[11]从三个尺度研究土壤有机质(SOM)和全氮(TN)的空间分布模式,以及不同尺度下土壤类型、土壤质地、土地利用类型及管理措施、地形对SOM与TN的影响,结果表明,SOM与TN的平均含量与变程均随着尺度的缩小而降低;不同尺度上主要影响因子不同,总体上随着尺度的降低,结构性因素影响能力逐渐下降。孔达等^[12]研究了五种采样尺度(32、48、64、80、96 m)下土壤含水量空间变异的尺度效应,结果表明,随着尺度的增大,其变异性

收稿日期:2018-06-27;修订日期:2018-11-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0300801);国家自然科学基金项目(41471186;41571217)。

作者简介:葛畅,男,山东临沂人,硕士生,研究方向为土壤肥沃耕层提升潜力与信息化管理。E-mail: gechang1105@126.com

通讯作者:张世文,E-mail: mamin1190@126.com

呈减小趋势;由随机部分引起的变异呈先降低后增加的趋势,空间相关程度呈先增加后下降的趋势;各尺度下土壤含水量具有多重分形特征。土壤肥力受多种因素的影响,单一指标的特征无法完全反映土壤肥力情况。

针对以上研究中的不足,本文以土壤肥力指数(Soil Integrated Fertility Index, IFI)作为土壤肥力的表征,采用变异函数、地理加权回归等方法,研究不同尺度下土壤肥力空间变异特征,分析不同尺度下各指标对土壤肥力的贡献程度变化,并研究不同尺度间土壤肥力影响因素作用差异,研究结果可为区域土壤肥力评价、土壤综合性质空间变异性研究提供方法参考。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

平谷区位于北京市东北部,位于 $116^{\circ}55'20''\text{E}$ — $117^{\circ}24'09''\text{E}$ 、 $40^{\circ}01'44''\text{N}$ — $40^{\circ}22'39''\text{N}$ 之间(图1),地处燕山山脉南麓与华北平原北端的相交地带,全区由北、东、南部山地和中部、西南部平原两大地貌单元组成。平谷区土壤(除裸岩和水库)主要有棕壤土、褐土、潮土等土类。平谷区属暖温带大陆性季风气候区,春季干旱多风,夏季高温多雨。平谷区是全国重要大桃产地之一,素有“中国桃乡”之称,果园面积占全区农用地总面积的68.68%,主要

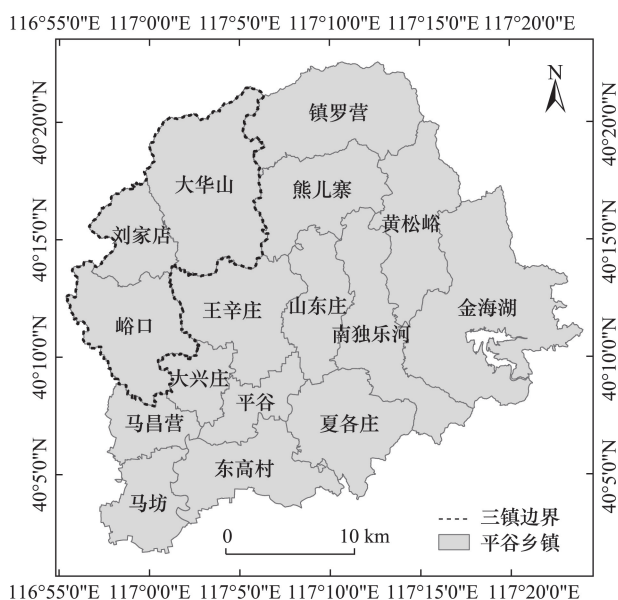


图1 研究区范围图

Figure 1 Scope of the study area

分布在中北部以及东部等中低山区;粮田和菜地分别占26.54%与4.77%,主要分布在南部平原地区。

2.2 数据获取与处理

综合考虑土地利用类型、土壤类型以及土壤母质类型等因素,平谷区与其西部大华山镇、刘家店镇、峪口镇三镇(以下简称三镇,具体位置见图1)具有相似的土地利用类型、土壤类型、土壤母质、高程、质地(图2),因此选择平谷区与三镇两个样本区域。为研究土壤肥力在不同采样幅度(采样范围大小)与采样粒度(采样间隔或密度)下所表现出的差异,本文设置三种采样方案分别对应三种尺度,并采用网格布点加分层抽样的原则,按照 $300\text{ m}\times 300\text{ m}$ 网格,全区共获得采样点834个(L尺度)(图2e),三镇共获得采样点180个(M尺度)(图2f),同时,在M尺度样点的基础上,对三镇进行加密采样,加密网格大小为 $150\text{ m}\times 150\text{ m}$,当样点与M尺度样点重合时,不再重复取样,三镇加密尺度下共获得样点446个(S尺度)(图2f),其中,L尺度与M尺度采样粒度相同而采样幅度不同,M尺度与S尺度采样幅度相同而采样粒度不同。采集表层0~20 cm土样,根据前人研究成果^[4,13],结合研究区特点,选择土壤pH、阳离子交换(CEC)、土壤有机质(SOM)、全氮(TN)、速效钾(AK)、有效磷(AP)、有效硼(AB)、有效铁(AFe)、有效锌(AZn)作为土壤肥力评价指标。采用重铬酸钾外热源法测定土壤有机质含量;半微量开氏法测定全氮含量; NaHCO_3 浸提—钼锑抗吸光度法测定有效磷含量;乙酸铵浸提—电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)法测定速效钾含量;二乙基三胺五乙酸(DTPA)溶液浸提—原子吸收光谱法测定微量元素养分含量;2.5:1水土比浸提—pH计法测定土壤pH。

2.3 研究方法

2.3.1 土壤肥力指数(IFI)计算

(1)运用主成分分析法确定指标权重。本文采用主成分分析法,确定土壤肥力评价指标权重。对标准化后的各指标进行主成分分析,选择特征值大于1的作为主因子,得到各主成分因子及贡献率(表1),通过土壤各指标对各主成分因子的总贡献率,确定各指标的权重(表2)。

(2)隶属度函数。由于各评价因子存在着量纲

2019年4月

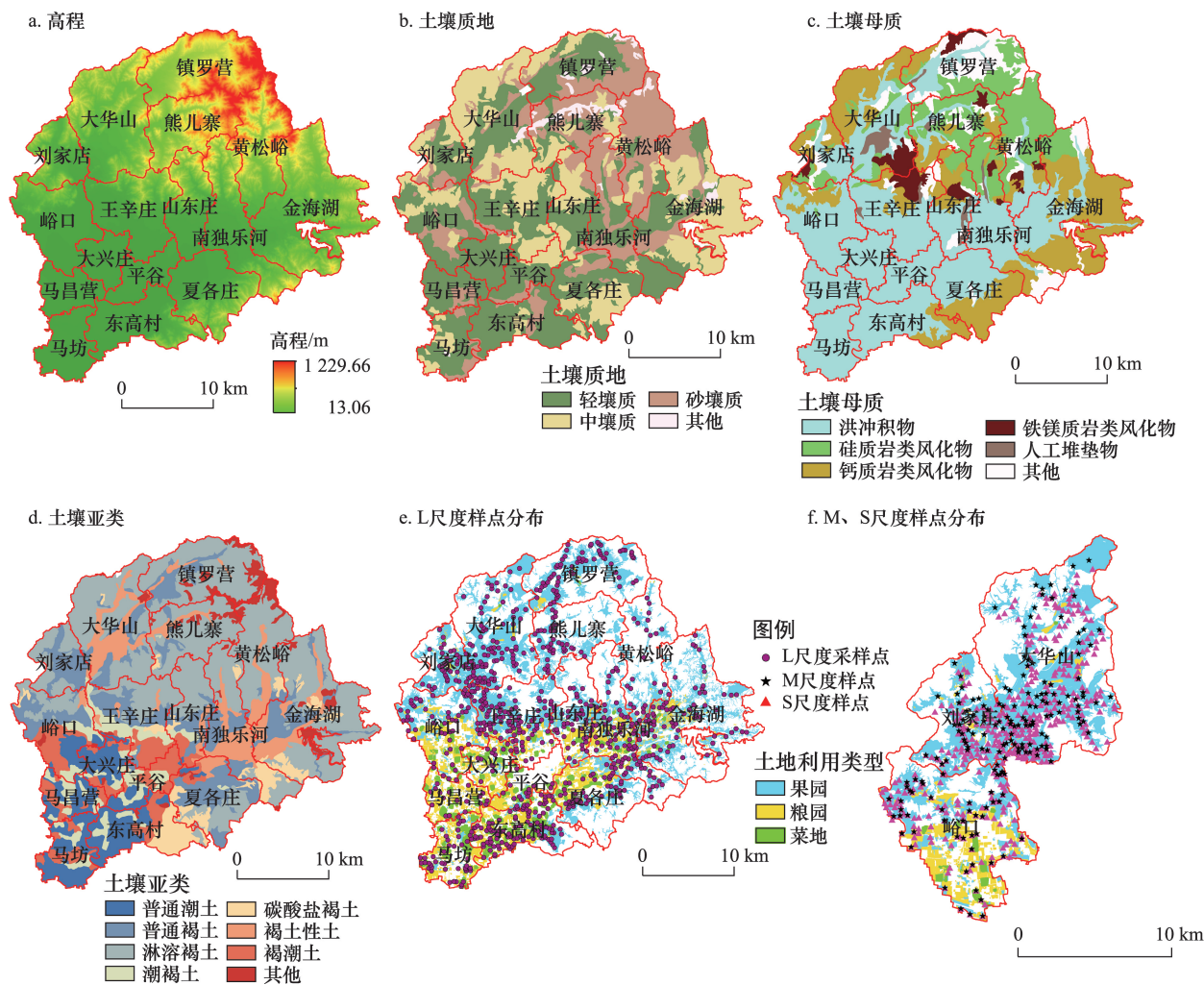


图2 平谷区土壤信息及样点分布

Figure 2 Soil information and distribution of the sampling sites in Pinggu District of Beijing Municipality

表1 各尺度主要因子特征值及贡献率

Table 1 Eigenvalue and contribution rates of the principal components at the large, medium, and small scales

尺度	主要因子	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
L	1	3.53	39.17	39.17
	2	1.96	21.81	60.97
	3	1.27	14.09	75.06
M	1	3.21	35.62	35.62
	2	1.96	21.81	57.43
	3	1.41	15.69	73.12
S	1	3.15	34.99	34.99
	2	1.95	21.63	56.62
	3	1.30	14.47	71.10

上的差异,所以通过建立相应的隶属度函数对评价指标进行标准化处理,以消除量纲的影响^[14]。隶属

度函数主要包括S型、高斯型、抛物线型等^[15,16]。

S型隶属度曲线公式:

$$f(x)=\begin{cases} 0.1 & x < x_1 \\ \frac{0.9(x-x_1)}{x_2-x_1}+0.1 & x_1 \leq x < x_2 \\ 1.0 & x \geq x_2 \end{cases} \quad (1)$$

抛物线型隶属度曲线公式:

$$f(x)=\begin{cases} 0.1 & x < x_1 \text{ 或 } x \geq x_4 \\ \frac{0.9(x-x_1)}{x_2-x_1}+0.1 & x_1 \leq x < x_2 \\ 1.0 & x_2 \leq x < x_3 \\ 1.0-\frac{0.9(x-x_3)}{x_4-x_3} & x_3 \leq x < x_4 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $f(x)$ 为土壤某肥力指标的隶属度值; x 为该肥力指标的实测值; x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 为该土壤肥力指标隶属

表2 各尺度各指标对应因子载荷值及权重

Table 2 Load values and weights of the principal components at the large, medium, and small scales

肥力指标	L尺度				M尺度				S尺度			
	因子1	因子2	因子3	权重	因子1	因子2	因子3	权重	因子1	因子2	因子3	权重
PH	-0.46	0.82	-0.07	0.11	-0.35	0.87	-0.05	0.11	-0.34	0.85	-0.18	0.12
CEC	0.21	0.27	0.74	0.08	0.13	0.17	0.74	0.07	0.18	0.25	0.68	0.08
SOM	0.70	0.17	0.44	0.12	0.63	0.17	0.42	0.11	0.69	0.27	0.29	0.12
TN	0.74	0.08	0.39	0.11	0.43	-0.12	0.65	0.10	0.45	0.06	0.62	0.09
AK	0.78	0.29	-0.17	0.12	0.83	0.21	-0.16	0.13	0.81	0.23	-0.20	0.13
AP	0.80	-0.16	-0.38	0.12	0.88	-0.12	-0.36	0.13	0.82	-0.23	-0.34	0.14
AB	0.41	0.69	-0.20	0.10	0.53	0.58	0.04	0.11	0.51	0.58	0.01	0.11
AFe	0.53	-0.74	0.05	0.12	0.37	-0.84	0.05	0.11	0.38	-0.80	0.18	0.12
AZn	0.73	0.22	-0.40	0.12	0.80	0.20	-0.32	0.13	0.76	0.05	-0.39	0.12

函数曲线转折点取值。

根据前人研究成果,结合研究区特点,选择各指标隶属度函数类型,其中,SOM、CEC、AFe、AZn、AB属于S型隶属度函数^[4]。而另一些元素并非越多越好,如当土壤中磷含量过高时,不能被植物吸收的磷元素会以难溶性磷酸盐的形式存在于土壤中,使土壤盐化和板结^[17];当土壤中氮含量过高时,会造成蔬菜体内硝酸盐含量超标^[18]。因此,土壤pH、全氮、有效磷、速效钾四种指标选择抛物线型隶属度函数。各指标隶属函数曲线转折点取值见表3。

(3)加权和法计算综合肥力指数(*IFI*):

$$IFI = \sum_{i=1}^n (f_i \times W_i) \tag{3}$$

式中:*IFI*为土壤肥力指数;*W_i*为第*i*个评价指标的权重;*f_i*为第*i*个评价指标上的隶属度。

2.3.2 变异度

变异度可以量化表达各尺度间变异性的差异,变异度越大说明两尺度间变异性的差异越大^[19-20]。变异度 *CV_{ratio}* 计算公式为:

$$CV_{ratio} = \left(\frac{CV_1 - CV_2}{CV_1 + CV_2} \right)^2 \tag{4}$$

式中:*CV₁*和*CV₂*分别表示两个不同尺度上的变异

系数。

2.3.3 变异函数

为研究不同尺度 *IFI* 空间变异性表现差异,对 *IFI* 进行变异函数分析。变异函数又称半变差函数、半变异矩,是地统计分析的特有函数。区域化变量 *Z(x)* 在点 *x* 和 *x+h* 处的值 *Z(x)* 与 *Z(x+h)* 差的方差的一半称为区域化变量 *Z(x)* 的变异函数,记为 *r(h)*, *r(h)* 称为变异函数^[21],其一般形式为:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \tag{5}$$

式中:*h* 为两样本点空间分隔距离(m);*r(h)* 是 *h* 的半方差函数值;*N(h)* 是间隔距离等于 *h* 的样本点的对数;*Z(x_i)* 为空间位置点 *x_i* 处指标的实测值;*Z(x_i+h)* 为空间位置点 *x_i+h* 处指标的实测值。

2.3.4 地理加权回归(GWR)

为分析不同尺度 SOM、TN、AP、AK 四种指标对 *IFI* 贡献程度的差异,对四种指标与 *IFI* 分别进行地理加权回归分析。地理加权回归模型是由地理学家 Fortheringham 等^[22]提出的一种新的空间局部回归方法,其模型的一般形式为:

表3 各指标隶属度转折点取值

Table 3 Turning point value of subordination degree of fertility indicators

转折点	pH	TN/(g/kg)	AP/(mg/kg)	AK/(mg/kg)	CEC/(cmol/kg)	SOM/(g/kg)	AFe/(mg/kg)	AZn/(mg/kg)	AB/(mg/kg)
x1	5.50	0.60	15.00	90.00	10.00	15.00	6.00	0.50	0.15
x2	6.50	1.10	40.00	180.00	25.00	30.00	16.00	3.00	1.00
x3	7.50	1.50	90.00	230.00					
x4	8.50	2.40	160.00	260.00					

2019年4月

$$y(u) = \beta_0(u) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u) \cdot x_k(u) + \varepsilon(u) \quad (6)$$

式中: $y(u)$ 为在位置 u 的因变量值; $x_k(u)$ 为位置 u 的第 k 个协变量的值; $\beta_0(u)$ 是截距项; $\beta_k(u)$ 是第 k 个协变量的回归系数; p 是协变量的个数; $\varepsilon(u)$ 是位置 u 的随机误差项。与普通线性回归模型相比,GWR最明显优点是对每个空间数据位置都估计其回归系数,具体GWR模型的拟合方法参见文献^[22,23]。

3 结果分析

3.1 描述性统计分析

采用SPSS 21.0软件,对各尺度土壤各指标及

IFI 进行描述性统计分析,结果如表4。

由表4可知,从L到M尺度,除pH与AB降低以外,其余元素均有不同程度的增加,其中AP增加66.52%,为所有指标最高;AF_e次之,为32.00%;AK增加20.25%,TN增加16.71%,AZn增加15.88%。与M尺度相比,S尺度下除pH增加外,其余指标均呈降低趋势,但各指标变化不大。其中,AP变化最大,也仅降低了4.17%。变异系数(CV)是衡量各观测值变异程度的一个统计量,当 $CV < 0.1$ 时,认为指标为弱变异;当 CV 介于0.1到1之间时,认为指标为中度变异;当 $CV > 1$ 时,认为指标为强变异^[24]。由表

表4 各尺度下肥力指标及 IFI 统计特征

Table 4 Descriptive statistics of soil fertility indicators and soil fertility index (IFI) at the large, medium, and small scales

尺度	指标	最小值	最大值	均值	标准差	偏度	峰度	变异系数/%
L	pH	4.39	8.32	7.24	0.73	-1.11	1.16	0.10
	CEC/(cmol/kg)	8.00	37.73	16.53	2.99	0.87	4.80	0.18
	SOM/(g/kg)	4.87	70.34	20.60	8.31	1.81	5.68	0.40
	TN/(g/kg)	0.36	6.29	1.40	0.61	3.24	18.33	0.43
	AK/(mg/kg)	38.00	939.50	215.56	138.63	1.88	4.02	0.64
	AP/(mg/kg)	0.56	820.60	127.57	159.17	1.99	3.85	1.25
	AB/(mg/kg)	0.14	1.29	0.41	0.17	1.82	4.66	0.41
	AF _e /(mg/kg)	5.61	173.00	32.91	27.45	2.18	5.64	0.83
	AZn/(mg/kg)	0.21	38.80	4.88	5.25	2.97	11.76	1.08
	IFI	0.20	0.87	0.61	0.12	-0.63	0.28	0.20
M	pH	4.48	8.08	6.85	0.77	-0.94	0.53	0.11
	CEC/(cmol/kg)	8.61	23.43	16.77	2.41	-0.16	0.46	0.14
	SOM/(g/kg)	7.27	69.53	21.88	7.86	1.65	7.04	0.36
	TN/(g/kg)	0.51	6.29	1.63	0.89	3.23	12.60	0.54
	AK/(mg/kg)	63.70	903.50	259.23	155.58	1.73	3.38	0.60
	AP/(mg/kg)	1.49	820.60	211.15	189.52	1.09	0.60	0.90
	AB/(mg/kg)	0.19	1.27	0.39	0.14	2.51	10.52	0.37
	AF _e /(mg/kg)	5.61	172.80	43.44	36.08	1.54	1.96	0.83
	AZn/(mg/kg)	0.51	36.11	5.65	5.07	2.60	10.64	0.90
	IFI	0.20	0.88	0.61	0.12	-0.72	1.22	0.19
S	pH	4.48	8.13	6.86	0.69	-0.70	0.47	0.10
	CEC/(cmol/kg)	8.09	26.43	16.56	2.50	-0.15	0.61	0.15
	SOM/(g/kg)	5.95	69.53	21.50	7.42	1.19	4.00	0.35
	TN/(g/kg)	0.51	6.29	1.59	0.84	3.14	12.23	0.53
	AK/(mg/kg)	63.60	903.50	254.18	151.99	1.59	2.60	0.60
	AP/(mg/kg)	0.41	824.20	202.34	183.39	1.11	0.70	0.91
	AB/(mg/kg)	0.07	1.27	0.39	0.15	1.97	6.16	0.40
	AF _e /(mg/kg)	5.23	178.20	41.99	33.39	1.71	3.04	0.80
	AZn/(mg/kg)	0.39	37.76	5.61	5.13	2.64	10.64	0.91
	IFI	0.20	0.88	0.61	0.11	-0.67	1.26	0.17

4可知,除L尺度下的AP与AZn变异系数为强变异外,其余各尺度下各指标均为中度变异,其中pH与CEC变异程度最低,各尺度下 CV 均小于0.2;AP与AZn变异程度最高,各尺度下均大于0.9。从L到M尺度,除pH与TN的 CV 增加外,其余各指标 CV 均减小;S尺度下,各指标 CV 变化不明显。土壤综合肥力指数(IFI)在三个尺度内差异不大,均在0.20~0.88之间,平均为0.61;三个尺度下其 CV 均低于0.20,属于中度变异,且随着尺度的缩小而降低。

3.2 不同尺度土壤肥力空间变异性及其尺度效应

3.2.1 不同尺度间变异度分析

变异度可量化地表达各尺度间变异性的差异,变异度越大说明两尺度间变异性的差异越大^[19,20]。图3为不同尺度间各指标变异度变化情况。

由图3可知,不同尺度间各指标变异度变化规律不同。总体上,L到M尺度、L到S尺度变异度相对较大;M到S尺度变异度较小。AP在L到M尺度、L到S尺度变异度最大;CEC与TN在L到M尺度、L到S尺度变异度较大,M到S尺度变异度最大

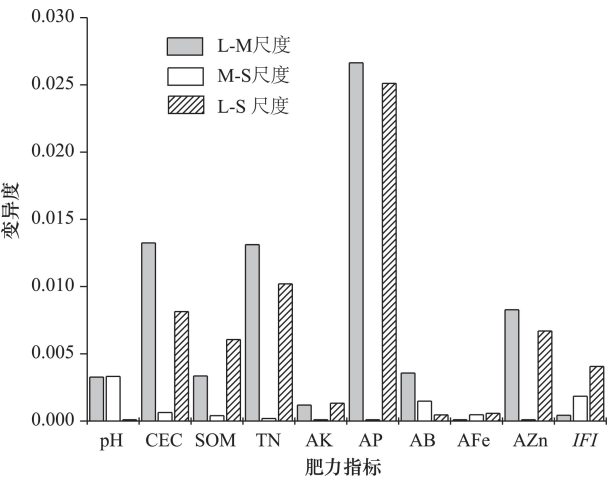


图3 不同尺度下各肥力指标及 IFI 变异度

Figure 3 CV_{ratio} of fertility indicators and soil fertility index (IFI) at different scales

的为pH,其次为AB。从变化规律上来看,随着尺度的变化,各指标变异度变化无一致规律,个别指标间存在相似性。如CEC、TN、AP、AZn、SOM、AK随着尺度的增大,变异度呈先减少后增加的趋势;而CEC、TN、AP、AZn在L到M尺度变异度最大,SOM、AK变异度最大值则出现在L到S尺度。不同尺度间 IFI 变异度的变化规律与以上指标变化规律均不相同,L到M尺度 IFI 变异度最小,L到S尺度变异度最大。

3.2.2 基于变异函数的 IFI 特征与尺度效应

经典统计学方法仅能从整体上描述土壤性质的部分特征,却难以反映其内部空间变异性,而应用地统计学方法可以定量地描述土壤性质空间变异的结构性与随机性^[11,21]。采用GS+7.0软件对不同尺度下 IFI 进行了半方差函数的拟合,用于分析各尺度下 IFI 的空间变异特征。综合考虑决定系数(R^2)、残差平方和(RSS)等参数,选择各尺度最优拟合模型(表5)。

由半方差函数拟合结果可知,L与M尺度最优拟合模型为指数模型,S尺度最优拟合模型为线性模型,由上表可知,随着尺度的缩小,采样密度的增加,块基比 $C_0/Sill$ 逐渐增加,在L、S和M尺度下分别为0.10、0.050和0.83。变程表示变异函数两点间的最大相关距离,是指半变异函数达到基台值时所对应的距离^[8,11]。在L、M和S尺度下,变程分别为1.71、45.63和11.75 km,即随着尺度的缩小,变程先增加后降低。变程过大会导致土壤性质的变异连续性差^[21],变程变化表明当研究区较小时,需要增加采样密度才能更好地反映其空间变异特征。

3.2.3 基于GWR的 IFI 指标贡献率尺度效应研究

SOM、TN、AP、AK是影响土壤质量好坏、土壤肥力高低的重要指标,同时,有机肥及氮磷钾肥也

表5 IFI 半方差函数模型及其相关参数

Table 5 Soil fertility index (IFI) semi-variogram model of residuals and its parameters

	变异函数	块金值 C_0	基台值 $Sill$	块基比 $C_0/Sill$	变程/km	RSS	R^2
L	指数模型	14.70E-4	141.00E-4	0.10	1.71	412.00E-08	0.55
M	指数模型	97.90E-4	197.00E-4	0.50	45.63	365.00E-08	0.91
S	线性模型	99.80E-4	120.00E-4	0.83	11.75	324.00E-08	0.64

2019年4月

是当前农田管理中极受重视的环节。为研究各指标对土壤肥力的贡献程度,以SOM、TN、AP、AK四种指标为例,采用地理加权回归的方法,为排除不同指标间的相互影响作用,将 IFI 分别与每个指标作回归,得到每个指标与 IFI 的拟合系数。基于各尺度样点,采用普通克吕格法,预测各尺度土壤指标空间含量,研究各指标对土壤肥力的贡献程度。

GWR分析结果显示,L尺度(图4)下,SOM、TN、AP、AK含量高的区域,其系数较低;相反地,当

SOM、TN等含量较低时,其系数相对较高。L尺度下,SOM在中部与南部地区系数较高,北部地区系数较低,大华山镇中南部、黄松峪乡南部及其他少数区域SOM系数为负值;TN系数分布与SOM相似,均呈北部低中部南部高的趋势,大华山镇大部分地区与黄松峪乡南部以及中北部区域少部分地区TN系数为负值;AP与AK系数分布规律相类似,均呈东部地区高、西部地区低的趋势,且两者负值均主要分布于大华山镇、刘家店镇、峪口镇三镇大

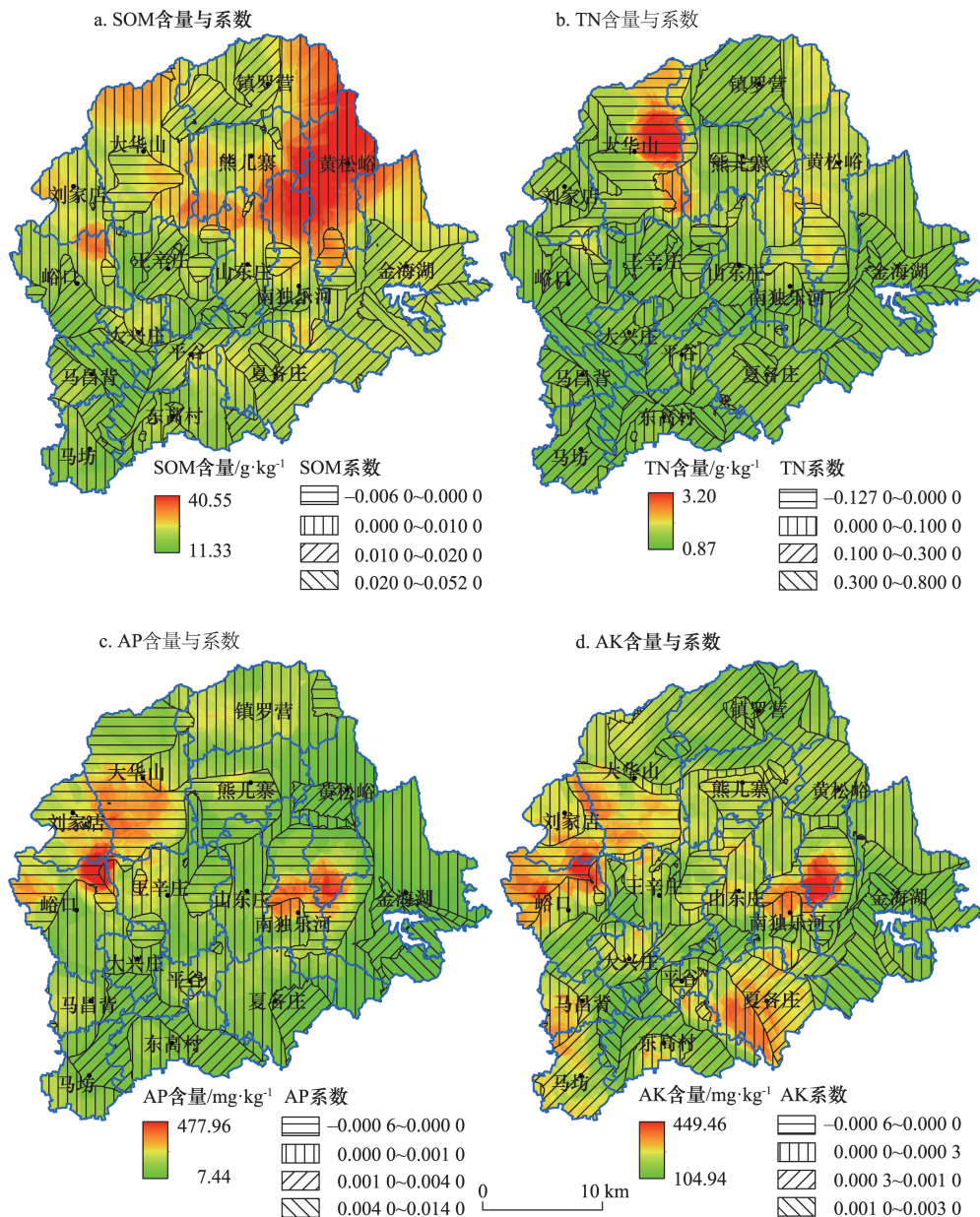


图4 L尺度四种指标含量与回归系数分布图

Figure 4 Distribution of values of the four indicators and regression coefficients at the large scale

部分地区,以及黄松峪乡、南独乐河镇、金海湖镇三镇交界处等地区。

M尺度与S尺度各指标系数分布规律相类似(图5)。两个尺度下,SOM系数均呈北部与南部低、中部高的趋势;TN系数均呈南部高、北部低的趋势;AP与AK分布相类似,均呈南部与北部高,中部低的趋势。与L尺度相比较,M与S尺度各指标系数负值区域所占比重均增加。

3.3 不同尺度影响因素分析

由前人研究可知,不同尺度下,不同土壤性质

受不同因素的影响效果存在差异^[8,25]。而土壤肥力是多种土壤性质的综合体现,不同影响因素的影响效果也与单一土壤性质不同。不同尺度下土地利用类型、高程、质地、母质、亚类等影响因素IFI方差分析结果如表6。

由上表可知,L尺度下粮田与果园和菜地存在显著性差异;S尺度下果园与粮田和菜地存在显著性差异;M尺度三者不存在显著性差异。L与M尺度下,随着高程增加,IFI先增加后减小,在50~100 m最高,而S尺度下随着高程增加IFI逐渐降低;L尺

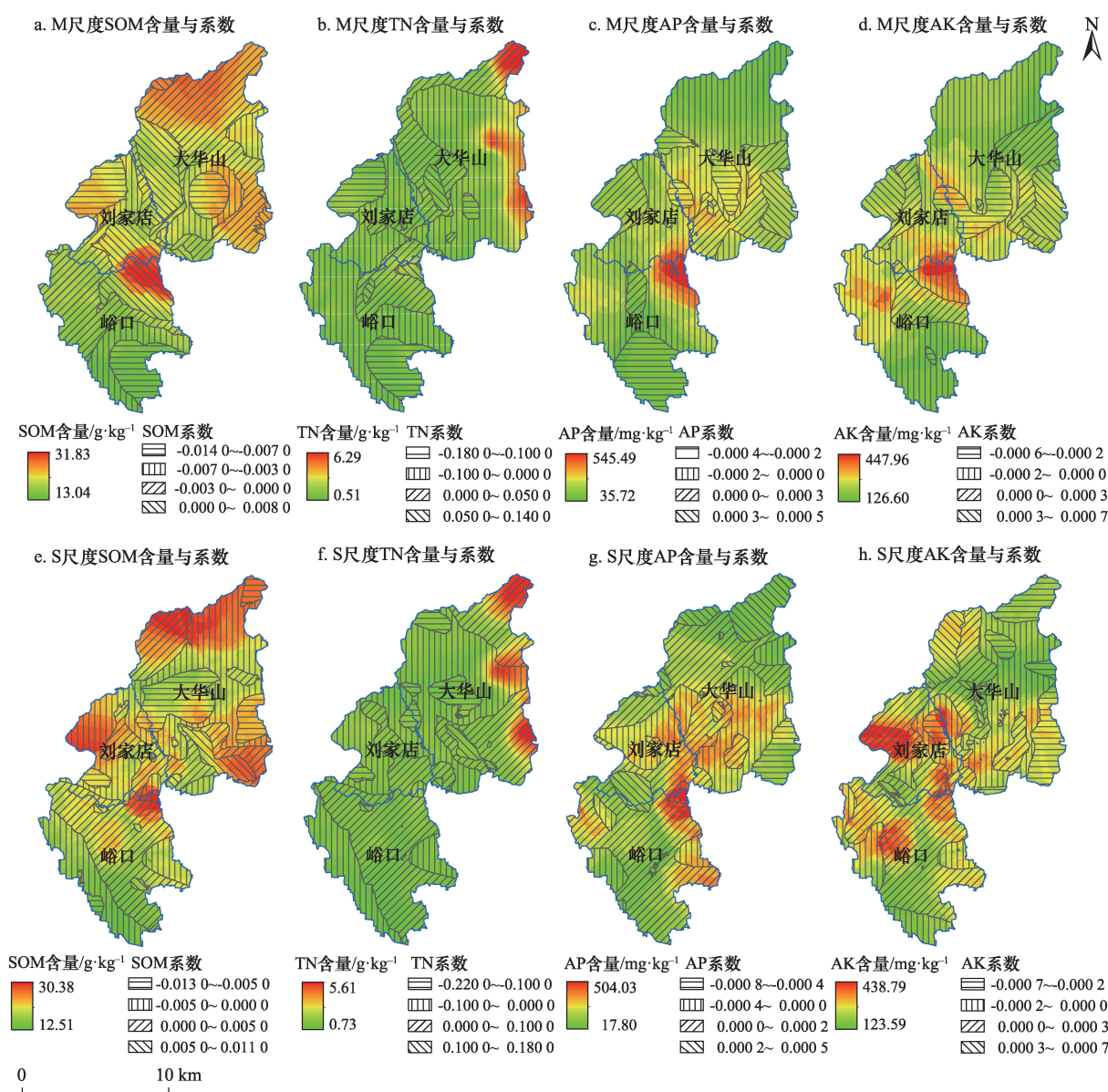


图5 M与S尺度四种指标含量与回归系数分布图

Figure 5 Distribution of values of the four indicators and regression coefficients at the medium and small scales

表6 不同尺度各因素IFI方差分析

Table 6 Soil integrated fertility index (IFI) variance analysis of various factors at different scales

		L尺度			M尺度			S尺度		
		均值	标准差	变异系数	均值	标准差	变异系数	均值	标准差	变异系数
地类	菜地	0.62a	0.14	0.22	0.67a	0.04	0.06	0.65a	0.06	0.08
	耕地	0.57b	0.13	0.24	0.65a	0.06	0.10	0.66a	0.08	0.12
	果园	0.61a	0.11	0.18	0.61a	0.12	0.20	0.60b	0.11	0.18
高程/m	≤50	0.59b	0.13	0.22	0.64a	0.08	0.13	0.65a	0.09	0.13
	50~100	0.63a	0.10	0.17	0.64a	0.10	0.15	0.61b	0.10	0.16
	100~200	0.62a	0.11	0.18	0.57b	0.14	0.25	0.59c	0.12	0.20
	>200	0.61ab	0.12	0.19	0.51c	0.08	0.16	0.59bc	0.11	0.19
质地	轻壤质	0.60b	0.12	0.20	0.61a	0.12	0.19	0.61a	0.10	0.17
	砂壤质	0.61b	0.12	0.20	0.61a	0.08	0.13	0.60a	0.11	0.18
	中壤质	0.62b	0.12	0.19	0.60a	0.11	0.19	0.62a	0.11	0.18
	其他	0.70a	0.07	0.09	0.55a	0.38	0.69	0.56a	0.11	0.19
母质	钙质岩类风化物	0.60b	0.13	0.22	0.54b	0.14	0.25	0.60b	0.12	0.20
	硅质岩类风化物	0.64ab	0.11	0.17	0.62ab	0.04	0.07	0.59b	0.08	0.14
	洪冲积物	0.61b	0.12	0.20	0.63a	0.10	0.17	0.61b	0.10	0.17
	人工堆垫物	0.63ab	0.08	0.13	0.54b	0.16	0.30	0.60b	0.12	0.19
	铁镁质岩类风化物	0.69a	0.09	0.13	0.59ab	0.07	0.12	0.71a	0.06	0.09
	其他	0.60b	0.12	0.20	0.58ab	0.15	0.26	0.62ab	0.10	0.17
亚类	潮褐土	0.60ab	0.12	0.20	0.65ab	0.05	0.07	0.65b	0.07	0.11
	褐潮土	0.59ab	0.14	0.24	0.60ab	0.01	0.02	0.67ab	0.10	0.15
	褐土性土	0.62a	0.09	0.15	0.58a	0.14	0.24	0.58a	0.11	0.19
	淋溶褐土	0.63a	0.12	0.19	0.58a	0.11	0.20	0.61ab	0.11	0.17
	普通潮土	0.58b	0.14	0.25	0.62ab	0.14	0.22	0.65ab	0.10	0.15
	普通褐土	0.61a	0.11	0.19	0.63b	0.10	0.16	0.62ab	0.10	0.16
	碳酸盐褐土	0.61ab	0.14	0.23	—	—	—	0.61ab	0.12	0.20

注:同一因素内均值后不同字母标注表示不同要素间具有显著性差异($p<0.05$)。

度下≤50 m高程组与50~100 m高程组、100~200 m高程组之间存在显著性差异,>200 m高程组与其他三组不存在显著性差异;M尺度下≤50 m高程组与50~100 m高程组不存在显著性差异,但该两组与其他两组相互之间均存在显著性差异;S尺度下100~200 m高程组与>200 m高程组不存在显著性差异,但该两组与其他两组相互之间存在显著性差异。研究区质地主要为轻壤质、砂壤质与中壤质,其他质地类型仅占小部分;L尺度下其他质地类型与另三种质地存在显著性差异,而M与S尺度下各质地类型间不存在显著性差异。研究区母质主要包括钙质岩类风化物、硅质岩类风化物、洪冲积物、人工堆垫物、铁镁质岩类风化物,其余所占比例较小的母质合并为一类;L尺度下铁镁质岩类风化物母质

与洪冲积物和其他母质类型存在显著性差异,其余母质之间不存在显著性差异;M尺度下仅洪冲积物母质与钙质岩类风化物二者之间存在显著性差异,其余母质之间不存在显著性差异;S尺度下铁镁质岩类风化物与除其他以外的母质类型均存在显著性差异,但其余母质之间不存在显著性差异。研究区土壤亚类主要有潮褐土、褐潮土、褐土性土、淋溶褐土、普通潮土、普通褐土与碳酸盐褐土。L尺度下普通潮土与褐土性土、淋溶褐土、普通褐土三者存在显著性差异,其他土壤亚类之间不存在显著性差异;M尺度下普通褐土与褐土性土、淋溶褐土二者存在显著性差异,其余土壤亚类之间不存在显著性差异;S尺度下仅潮褐土与褐土性土存在显著性差异,其余土壤亚类之间不存在显著性差异。

4 讨论

L尺度到M尺度AP变化明显。除L尺度下的AP与AZn为强变异外,其余各尺度下各指标均为中度变异(表4),这是由于三镇,尤其是大华山镇为平谷主要的大桃生产基地,有机肥及化肥用量高于全区平均水平。此外,三镇整体地形相对较平坦,AP等流失量低,易积累,这也与胡克林等^[26]研究结果相一致。各尺度间IFI差异不大,并没有表现出与其他指标相似的规律,这是由于IFI是各指标综合作用的结果,不同尺度下各指标的上升或下降对IFI的影响作用会相互影响,使得IFI趋于一致。不同尺度间IFI变异度与其他各指标存在明显差异(图3),表明土壤单一指标或几种指标单独的变异特征并不能代表土壤肥力变异状况;IFI是各指标综合作用的结果,虽然各指标L到M尺度变异度均很大,但不同指标间具有一定的抵消作用,这也与描述性统计结果(表4)相一致。

$C_0/Sill$ 通常被用于描述变量的空间依赖性,可作为研究因子空间相关的分类依据^[8,21,27]。当 $C_0/Sill < 0.25$ 时,表示强空间相关性;当 $C_0/Sill$ 介于0.25~0.75之间时,为中等空间相关性;当 $C_0/Sill > 0.75$ 时,表示弱空间相关性^[11,28,29]。随着尺度的缩小、采样密度的增加, $C_0/Sill$ 逐渐增加,L尺度具有强空间相关性,M尺度具有中等空间相关性,而S尺度具有弱空间相关性(表5)。不同尺度 $C_0/Sill$ 变化表明,随着尺度的缩小、采样密度的增加,随机因素引起的变异在总变异中所占比重逐渐增大,这是由于随着尺度缩小,土壤类型、地形地貌等结构性因素逐渐趋于一致,结构性因素变化引起的变异逐渐减小,土地利用方式、田间管理等随机性因素引起的误差逐渐增加,这也与前人研究结果相一致^[8,21]。

各尺度下SOM、TN、AP、AK含量与其系数成反比,L尺度下这种规律最为明显(图4)。除有回归算法的原因外,更主要是由于平谷区IFI整体较高,当SOM、TN等含量达到一定时,再增加其含量对土壤肥力的贡献相对较小,甚至会产生相反效果。例如,当土壤中N、P、K等含量过高时,会造成土壤板结^[17]。有研究表明,当土壤中氮含量过高时,会造成作物体内的硝酸盐含量超标,危害人体健康^[18],这也

是TN、AP、AK含量高的区域其系数为负的原因。一般认为,SOM与土壤肥力呈正相关,而图4与图5显示,部分区域SOM系数为负,是由于这些区域内其他指标或影响因素对土壤肥力的作用强于SOM。如大华山镇中部地区SOM系数为负,是由于TN、AP、AK含量过高,造成IFI下降。随着尺度的缩小,各指标系数总体上呈降低的趋势,更多的区域出现负值,是由于随着尺度的降低,IFI空间相关性下降,随机因素造成的误差增大,使得各指标与IFI的相关性降低造成的,这与变异函数分析结果相一致。M尺度下SOM系数分布与L尺度不同,含量高的区域系数很高,是由于M尺度下高值区域SOM值(最大值为31.83 g/kg)低于L尺度(最大值为40.55 g/kg),SOM对土壤肥力的贡献依然很高。S尺度各指标系数较M尺度变化范围略有增加,空间波动更大,这是因为随着采样密度的增加,可更加细致地反映出土壤属性变化情况。

不同影响因素对IFI的影响作用具有明显的尺度效应,各因素在不同尺度下对IFI的影响作用总体上呈减弱的趋势。如L尺度下其他质地类型与轻壤质、砂壤质与中壤质存在显著性差异,而M与S尺度四者差异不存在显著性(表6),这与上文变异函数分析结果相一致。不同要素在不同尺度下对IFI的作用效果也存在差异,如地类对IFI的影响作用随尺度的降低呈先降低后增加的趋势,而高程则呈先增加后降低的趋势;同一要素在不同尺度下对IFI的作用效果也不相同,如L尺度下普通潮土与普通褐土存在显著性差异,而M与S尺度下二者则不存在显著性差异,S尺度下潮褐土与褐土性土存在显著性差异,而L、M尺度二者差异并不显著。

5 结论

本文研究了北京市平谷区土壤肥力及其影响因素在L、M、S三种尺度下的空间尺度效应,获得以下结论:

(1)不同尺度下土壤各指标差异明显。在三种尺度下IFI均在0.61左右,差异不明显,CV随着尺度的减小而降低;受各指标综合作用的结果,不同尺度间IFI变异度变化规律与各土壤指标均不相同。

(2)IFI的空间变异性具有明显的尺度效应。

2019年4月

*IFI*的块基比随尺度的降低呈增加趋势,L尺度为0.10,具有强空间相关性,M尺度为0.67,具有中等空间相关性,S尺度为0.83,具有弱空间相关性;随着尺度的降低,随机性因素引起的误差逐渐增加;随着尺度的降低变程先增加后降低,各尺度下 IFI 变程分别为1.71、45.63、11.75 km。

(3)GWR分析显示,不同尺度下不同土壤养分含量对 IFI 的贡献程度不同。由于SOM、TN、AP、AK含量较高,使得各尺度下SOM、TN、AP、AK含量与其系数成反比。随着尺度的缩小,SOM、TN、AP、AK四种指标对 IFI 的贡献作用呈降低趋势;单一土壤性质对 IFI 的作用会受到其他性质的影响而表现出不同的规律;S尺度与M尺度各指标含量与系数变化显示,采样密度的增加,可更加细致地反映出土壤属性变化情况。

(4)方差分析结果表明,土壤亚类、母质等因素对 IFI 的影响效果具有明显的尺度效应。不同要素在不同尺度下对 IFI 的作用效果存在差异,同一要素在不同尺度下对 IFI 的作用效果也不相同。随着尺度的降低,地类、质地、土壤亚类对 IFI 的影响作用呈减弱的趋势;土壤母质呈先降低后增加的趋势;高程呈增加的趋势。研究结果可为区域土壤肥力评价、土壤综合性质空间变异性研究提供方法参考。

参考文献(References):

- [1] 王晶,任丽,杨联安,等.基于云模型的西安市蔬菜区土壤肥力综合评价[J].干旱区资源与环境,2017,31(10):183-189.[Wang J, Ren L, Yang L A, et al. Evaluation of soil fertility of vegetable field in Xi'an City based on cloud model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(10): 183-189.]
- [2] 欧阳纯烈,何云晓.基于模糊综合评判法的四川绵阳土壤肥力质量评价[J].贵州农业科学,2013,41(9):101-103.[Ouyang C L, He Y X. Evaluation of soil fertility by a fuzzy comprehensive method in Mianyang, Sichuan[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2013, 41(9): 101-103.]
- [3] 王君楠,刘斌,周生路,等.基于土壤肥力的江苏省耕作层土壤剥离分区与深度确定[J].农业工程学报,2017,33(5):257-263.[Wang J X, Liu B, Zhou S L, et al. Determination of peel depth and partition in cultivated soil of Jiangsu Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(5): 257-263.]
- [4] 叶回春,张世文,黄元仿,等.北京延庆盆地农田表层土壤肥力评价及其空间变异[J].中国农业科学,2013,46(15):3151-3160.[Ye H C, Zhang S W, Huang Y F, et al. Assessment of surface soil fertility and its spatial variability in Yanqing Basin, Beijing, China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(15): 3151-3160.]
- [5] 马小龙,余旭,王朝辉,等.旱地小麦产量差异与栽培、施肥及主要土壤肥力因素的关系[J].中国农业科学,2016,49(24):4757-4771.[Ma X L, She X, Wang Z H, et al. Yield variation of winter wheat and its relation to cultivation, fertilization, and main soil fertility factors[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(24): 4757-4771.]
- [6] Zhang Y, Li C, Wang Y, et al. Maize yield and soil fertility with combined use of compost and inorganic fertilizers on a calcareous soil on the North China Plain[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 155: 85-94.
- [7] 陈小梅,姚玉才,章明奎.浙东海积平原耕地土壤肥力特征及空间变化规律研究[J].土壤通报,2016,47(3):618-623.[Chen X M, Yao Y C, Zhang M K. Soil fertility and its spatial variation pattern of cultivated land in Marine Plain of Zhejiang Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(3): 618-623.]
- [8] Zhang S, Xia C, Li T, et al. Spatial variability of soil nitrogen in a hilly valley: Multiscale patterns and affecting factors[J]. Science of the Total Environment, 2016, 563-564: 10-18.
- [9] Liu Y, Lv J, Zhang B, et al. Spatial multi-scale variability of soil nutrients in relation to environmental factors in a typical agricultural region, Eastern China[J]. Science of the Total Environment, 2013, 450-451: 108-119.
- [10] 张世文,葛畅,陈晓辉,等.区域土壤有机碳空间分布特征与尺度效应[J].农业工程学报,2018,34(2):159-168.[Zhang S W, Ge C, Chen X H, et al. Spatial distribution characteristics and scale effects of regional soil organic carbon[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(2): 159-168.]
- [11] Hu K, Wang S, Li H, et al. Spatial scaling effects on variability of soil organic matter and total nitrogen in suburban Beijing[J]. Geoderma, 2014, 226-227(1): 54-63.
- [12] 孔达,王立权,刘继龙,等.黑土区农田土壤含水量空间变异性的尺度效应研究[J].水利学报,2017,48(5):608-612.[Kong D, Wang L Q, Liu J L, et al. Scale effect of spatial variability of crop-land soil water content in black soil region[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(5): 608-612.]
- [13] 张汪寿,李晓秀,黄文江,等.不同土地利用条件下土壤质量综合评价方法[J].农业工程学报,2010,26(12):311-318.[Zhang W S, Li X X, Huang W J, et al. Comprehensive assessment methodology of soil quality under different land use conditions[J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(12): 311-318.]
- [14] 范海荣, 吴素霞, 常连生. 秦皇岛市草坪土壤肥力数值化综合评价与对策研究[J]. 草业科学, 2013, 30(1): 9-15. [Fan H R, Wu S X, Chang L S. Comprehensive digitization evaluation of turf soil fertility and management countermeasure research on turf soil in Qinhuangdao[J]. Pratacultural Science, 2013, 30(1): 9-15.]
- [15] 潘瑞, 刘树庆, 颜晓元, 等. 河北省农地土壤肥力特征时空变异分析及其质量评价[J]. 土壤通报, 2011, 42(4): 828-832. [Pan R, Liu S Q, Yan X Y, et al. Analysis of spatial and temporal variation for soil fertility characteristics and quality assessment for Hebei farming land[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(4): 828-832.]
- [16] Mokarram M, Hojati M. Using ordered weight averaging (OWA) aggregation for multi-criteria soil fertility evaluation by GIS (case study: Southeast Iran)[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 132: 1-13.
- [17] 杨宁, 张荣标, 张永春, 等. 基于微生物生态效益的土壤肥力综合评价模型[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 108-112. [Yang N, Zhang R B, Zhang Y C, et al. Soil fertility synthesis evaluation model based on ecological benefit of microorganism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 108-112.]
- [18] 陆扣萍, 谢寅峰, 闵炬, 等. 不同施氮量对太湖地区新增设施菜地土壤硝态氮累积的影响[J]. 土壤, 2011, 43(6): 903-909. [Lu K P, Xie Y F, Min J, et al. Effects of different N rates on soil nitrate nitrogen accumulation in new plastic greenhouse of Taihu Lake Region[J]. Soils, 2011, 43(6): 903-909.]
- [19] 王美艳, 史学正, 于东升, 等. 黄淮海农业区旱地土壤有机碳变异性的空间尺度效应[J]. 土壤, 2013, 45(4): 648-654. [Wang M Y, Shi X Z, Yu D S, et al. Scale effects of soil organic carbon variability of uplands in Huang-Huai-Hai Agriculture Region of China[J]. Soils, 2013, 45(4): 648-654.]
- [20] Zhou Y, Biswas A, Ma Z, et al. Revealing the scale-specific controls of soil organic matter at large scale in Northeast and North China Plain[J]. Geoderma, 2016, 271: 71-79.
- [21] 李龙, 姚云峰, 秦富仓, 等. 小流域土壤有机碳密度空间变异特征的尺度效应研究[J]. 土壤, 2014, 46(5): 787-792. [Li L, Yao Y F, Qin F C, et al. Scale-dependency of spatial variability of soil organic carbon density in small watershed[J]. Soils, 2014, 46(5): 787-792.]
- [22] Brunsdon C, Fotheringham S, Charlton M. Geographically weighted regression-modelling spatial non-stationarity[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1998, 47(3): 431-443.
- [23] 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. [Qu M K, Li W D, Zhang C R, et al. Geographically weighted regression and its application prospect in soil and environmental sciences[J]. Soils, 2014, 46(1): 15-22.]
- [24] 陈洋, 齐雁冰, 王茵茵, 等. 多重密度布点对土壤有机质空间特性的解析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(12): 2099-2110. [Chen Y, Qi Y B, Wang Y Y, et al. Spatial characters of soil organic matter with multi-sampling density[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(12): 2099-2110.]
- [25] 顾成军, 史学正, 于东升, 等. 省域土壤有机碳空间分布的主控因子: 土壤类型与土地利用比较[J]. 土壤学报, 2013, 50(3): 425-432. [Gu C J, Shi X Z, Yu D S, et al. Main factor controlling SOC spatial distribution at the province scale as affected by soil type and land use[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(3): 425-432.]
- [26] 王淑英, 胡克林, 路苹, 等. 北京平谷区土壤有效磷的空间变异特征及其环境风险评价[J]. 中国农业科学, 2009, 42(4): 1290-1298. [Wang S Y, Hu K L, Lu P, et al. Spatial variability of soil available phosphorus and environmental risk analysis of soil phosphorus in Pinggu County of Beijing[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(4): 1290-1298.]
- [27] 李珊, 李启权, 王昌全, 等. 成都平原西部土壤全磷的剖面分布及主控因素[J]. 资源科学, 2018, 40(7): 1397-1406. [Li S, Li Q Q, Wang C Q, et al. Profile distribution of soil total phosphorus and controlling factors on the west Chengdu Plain[J]. Resources Science, 2018, 40(7): 1397-1406.]
- [28] 徐翠兰, 侯淑楠, 姚紫东, 等. 南方农田土壤容重空间变异性及其尺度效应[J]. 排灌机械工程学, 2017, 35(5): 424-429. [Xu C L, Hou S N, Yao Z D, et al. Spatial variability and scale effect of soil bulk density of farm land in South China[J]. Journal of Drainage & Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(5): 424-429.]
- [29] 张世文, 宁汇荣, 高会议, 等. 基于各向异性的区域土壤有机碳三维模拟与空间特征分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 115-124. [Zhang S W, Ning H R, Gao H Y, et al. Three-dimensional simulation and spatial characteristics of soil organic carbon based on anisotropy in region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(16): 115-124.]

Scale effect of soil fertility spatial variability and its influencing factors

GE Chang¹, LIU Huilin¹, NIE ChaoJia¹, SHEN Qiang², ZHANG Shiwen¹

(1. Earth and Environmental Sciences, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. Faculty of Surveying and Mapping, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to reveal the spatial variability of regional soil fertility and its influencing factors, and their change with scale, this study took Pinggu District of Beijing Municipality as the study area, and examined soil fertility and variability at three spatial scales — the whole district (large), three towns in the western part of the district (medium), and dense sampling in the same three towns (small). The soil Integrated Fertility Index (*IFI*), which was calculated by the weighted sum method, was used for the characterization of soil fertility. Combined with the methods of variation function and geographically weighted regression (GWR), the spatial variability characteristics of *IFI*, the contribution degree of each evaluation indicator to soil fertility, and the scale effect were analyzed. Difference of the influencing factors of soil fertility at different scales were identified and characterized. The results show that the difference of soil fertility influencing factors at different spatial scales was obvious, while *IFI* was around 0.61 at all three scales, and the *CV* ratio changes of *IFI* between different scales were different compared to other indicators. The spatial variability of *IFI* illustrated a significant scale effect. The *C₀/Sill* of *IFI* increased with the decrease of scale and the proportion of variation caused by random factors increased gradually. *IFI* showed a strong spatial correlation at the large scale, moderate spatial correlation at the medium scale, and weak spatial correlation at the small scale. The contribution of different soil nutrient contents to *IFI* varied at different scales. From the large to the small scale, the nutrient coefficients exhibited a decreasing trend, and the range of nutrient coefficients increased slightly from medium to small scale. The effect of a soil property on *IFI* will be affected by other properties. Factors such as soil subclass and parent material had an obvious scale effect on *IFI*. As the scale decreases, the influence of various factors on *IFI* decreased generally. The results provide a technical support for regional soil fertility evaluation and spatial pattern analysis at different scales.

Key words: soil Integrated Fertility Index(*IFI*); influencing factors; scale effect; variogram; geographically weighted regression; Pinggu District of Beijing Municipality