

DEM 栅格分辨率对多元线性土壤—景观模型及其制图应用的影响^{*}

孙孝林^{1,2} 赵玉国^{1†} 秦承志³ 李德成¹ 赵量^{1,4} 张甘霖¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

(4 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210008)

摘要 以亚热带丘陵地区为对象, 以该区 4 km × 3 km 的 5 m、10 m、15 m、20 m、25 m、30 m 数字高程模型 (DEM) 为基础, 建立多元线性土壤—景观模型, 并应用该模型预测研究区内土壤表层有机质含量分布, 进而比较不同分辨率 DEM 中土壤—景观模型及其预测制图的精度。结果表明: 在本研究区 11 km² 范围内, 随着 DEM 栅格分辨率降低, 坡度、曲率、比汇水面积 (对数) 频度均表现出了向其中值区集中的趋势; 地形因子的这一变化规律对土壤—景观模型的影响较小, 例如模型的变量、变量系数及 R² 在不同分辨率 DEM 中的差异很小; 但地形因子的这一变化规律对模型预测制图的精度具有较大影响, 各项指标均说明, 模型在 10 ~ 25 m DEM 中的制图精度较高, 而在更高分辨率 (5 m) 或更低分辨率 (30 m) DEM 中较低。本研究结果对其他亚热带丘陵地区具有一定的指示意义。

关键词 DEM 分辨率; 土壤—景观模型; 预测制图; 土壤有机质; 地形因子

中图分类号 P934 **文献标识码** A

土壤—景观模型能描述土壤与其形成环境之间的定量关系, 可作为定量土壤调查与制图方法的基础^[1~4]。在最近的 20 a 里, 随着地理信息系统、遥感、数字地形分析等技术手段的发展, 该类模型已在土壤调查与制图研究中得到了广泛的应用^[5]。Scull 等^[6]将这种基于定量土壤—景观模型的制图方法称为预测性制图。

McBratney 等^[5]对这种制图方法进行了系统总结, 其总结出的模型有: 线性回归、模糊逻辑、地统计、树模型、专家系统等近 10 种; 可预测及编制包括土壤类型和土壤物理、化学、微生物、水文等多种土壤信息; 模型所采用的景观要素主要有: 地形、植被、母质等。此外, 一些研究还对土壤—景观模型及其制图应用的景观要素进行了比较分析, 如模型建立方法、采样密度、景观特征等^[7~9]。在这些研究中, 有 80% 的研究采用了数字高程模型 (DEM) 派生的地形因子来模拟土壤—景观模型, 如海拔、坡度、坡

向、平面/剖面曲率、地形湿度指数等, 而其他景观要素在研究中的应用均不超过 35%^[5]。因此, DEM 派生地形因子的精度也是影响土壤—景观模型及其应用制图的重要因素^[10~12]。

大量的研究表明, DEM 栅格分辨率对派生地形因子的精度的影响很大^[10~14]。当应用 DEM 派生的地形因子进行生态、水文、土壤等环境模拟和预测制图时, 这种影响势必会扩展到模型及其预测制图的结果上^[10~12]。Chaplot 等^[10]在面积 10 hm² 高差 10 m 的山坡上比较了多元线性土壤—景观模型在不同栅格分辨率 DEM 中的预测精度, 结果表明, 模型的预测精度在很大程度上取决于 DEM 栅格分辨率, 且随着 DEM 栅格分辨率降低 (由 10 m 到 50 m) 而降低。Thompson 等^[11]的研究结果则认为, 高分辨率 DEM 并不意味着高精度的预测结果, 多元线性土壤—景观模型在 10 m、30 m DEM 中具有相似的预测精度, 这可能是因为: 在面积 13 hm² 高差 20 m 的

^{*} 国家自然科学基金项目 (40401024, 40501056) 和江苏省自然科学基金项目 (BK2006526) 资助

[†] 通讯作者, E-mail: yzhuo@issas.ac.cn

作者简介: 孙孝林 (1980 ~), 湖北荆州人, 博士研究生, 主要从事土壤资源、信息系统等方面的研究。E-mail: xlsun@issas.ac.cn

收稿日期: 2007 - 05 - 04; 收到修改稿日期: 2007 - 07 - 16

研究区内,不同栅格分辨率 DEM 之间的地形差异较小,模型对这种较小的差异不敏感,而高密度土壤采样(143个样点)已足以说明土壤属性的空间变异。他们进一步指出,DEM 分辨率的问题在流域或地区内的研究中显得非常重要。Smith 等^[12]研究了分辨率与邻域大小对土壤-环境推理模型(SoLM^[15,16])的影响,结果表明,DEM 分辨率对土壤调查精度的影响还取决于景观特征。综上所述,DEM 栅格分辨率对土壤-景观模型及其制图应用的影响同时还受到其他多种因素的影响,在不同景观及不同采样方式下,影响的表现形式不同。

本研究以亚热带丘陵地区为研究对象,在皖南山区向长江沿江平原过渡的丘陵地形内,选择面积近 12 km²的研究区,从该区 6 种栅格分辨率 DEM 中提取地形因子,分析 DEM 栅格分辨率对地形因子的

影响规律,进而分析 DEM 栅格分辨率对线性土壤-景观模型及其制图应用的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及数字高程模型

研究区位于安徽省东南部的宣城市,为皖南山区与长江沿江平原的过渡地带,地理位置为 118°37'31"~118°40'15"E,30°50'55"~30°52'30"N,东西宽 4 000 m,南北长 2 830 m,面积 11.32 km²。该区属于亚热带湿润季风气候类型;海拔 31~83 m,丘陵特征明显;成土母质主要为白垩纪风化物及第四纪红土和下蜀黄土;植被类型为常绿针叶林和落叶阔叶林,以次生林为主,林地和草地共占研究区的 50%左右,旱地、水田约占 32%。

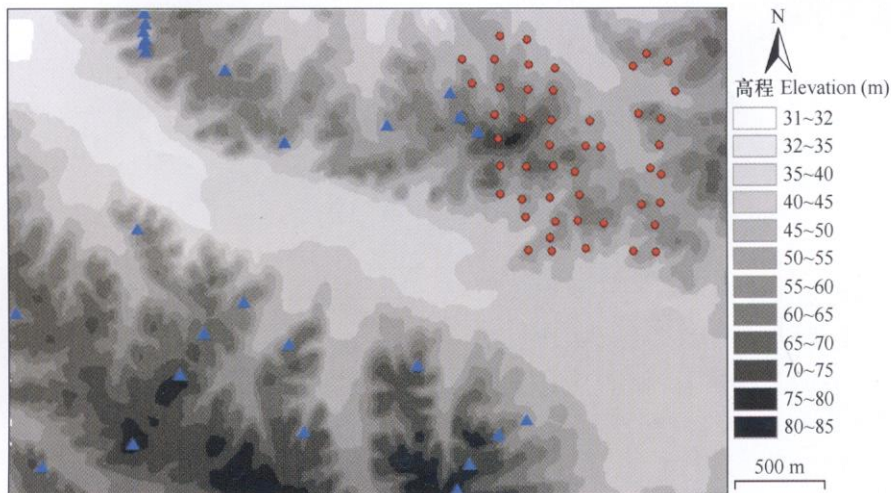


图 1 研究区 DEM 图(红色圆点为建模点,蓝色三角点为验证点)

Fig. 1 DEM of the study area (Red points: Modeling sites; Blue points: Verification sites)

在 Arcgis 软件中,数字化研究区 1:10 000 比例尺、2.5 m 等高距的地形图,包括等高线、高程点和河网、水面等,生成 6 种不同栅格分辨率的 DEM,分别为 5 m、10 m、15 m、20 m、25 m、30 m。

1.2 土壤采样

分为训练点和验证点采样两部分。首先,根据研究区母质、地形特征和土地利用信息,选择训练点,用于建立土壤-景观模型。训练点集中在训练区内,该训练区代表了研究区母质、地形、土地利用等特征。训练点的选择按照系统采样法,间隔约 150 m,共采集了 48 个样点。为使这些点分别代表不同高度、不同坡向上的坡顶、坡中、坡底等典型地貌部位且受人为干扰(耕作)小,特根据地形图等高

线和航片上的土地利用状况,对这些点的空间位置进行局部调整(图 1)。

另一部分采样为验证点,用于验证土壤-景观模型及其制图应用的精度。验证点分布在训练区以外的其他研究区内,选择验证点的原则基本与训练点相同,代表不同的地貌位置且受人为干扰(耕作)小,共 26 个样点(图 1)。

采样点布置完成后,在实地按照中国土壤系统分类,根据土壤发生学特征,对土壤剖面进行发生层划分,详细记载每个发生层的形态特征,并分层采样以分析土壤属性。本研究分析的土壤属性为表层(A层)有机质含量(g kg^{-1})。

1.3 地形因子计算及其受栅格分辨率影响的评价方法

地形因子是描述地形特征的指标,常用于土壤—景观模型的地形因子有:海拔高程(m)、坡度(°)、坡向(°)、平面曲率(Plan Curvature, $(100\text{m})^{-1}$)、剖面曲率(Profile Curvature, $(100\text{m})^{-1}$)、比汇水面积(Specific Catchment Area, $\text{m}^2 \text{m}^{-1}$)、地形湿度指数(Topographic Wetness Index)、径流强度系数(Stream Power Index)等^[17]。各地形因子因其物理意义不一而对土壤形成演变具有不同的影响。例如坡度影响地面物质和能量流动的方向;平面曲率和剖面曲率分别影响着物质和能量流动的加速集中或减速分散;比汇水面积、地形湿度指数、径流强度系数表征着水流分配,如地形湿度指数,能有效地指示土壤内水分运动和土壤相对含水量^[17,18]。在DEM中,计算每个栅格点的坡度、平面曲率、剖面曲率、比汇水面积、地形湿度指数、径流强度系数。坡度的计算采用Arcgis软件中的空间分析模块;平面曲率和剖面曲率的计算应用Arc/Info的Grid模块;比汇水面积的计算采用MFD-fg多流向算法^[19](对DEM洼地、平区的预处理方法参见文献[20]);地形湿度指数和径流强度系数的计算通过Arcgis的栅格运算完成,各地形因子的计算公式参见文献[17]。

对所选地形因子分别统计最小值(Min)、最大值(Max)、平均值(Mean)、标准差(SD),并结合频度直方图,讨论这些地形因子在不同栅格分辨率DEM中的分布,说明DEM栅格分辨率对地形因子的影响。Moore等^[21]将地形因子分为一级地形因子(坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率、比汇水面积)和二级地形因子(地形湿度指数、径流强度系数),二级地形因子是一级地形因子的派生。因此,本文主要分析了一级地形因子:坡度、平面曲率、剖面曲率、比汇水面积受DEM分辨率的影响。由于比汇水面积的变程很大,在土壤—景观模型中,一般采用其自然对数进行分析,下文称比汇水面积对数^[7-11,17,21]。

1.4 土壤—景观模型及其制图应用精度的评价方法

通过多元线性逐步回归方法,拟合训练点土壤属性(本文以表层有机质含量为例)与每种分辨率DEM中地形因子之间的关系,作为对应分辨率DEM中的土壤—景观模型。

应用建立的土壤—景观模型,预测土壤表层有机质含量在研究区内的空间分布及制图表达,通过比较验证点上的模型预测值(P)和实际观测值(O),来评估模型的预测制图精度。评价模型的制图精度所采用的指标为:平均误差、误差均方根、一致性系数。

$$(1) \text{平均误差 (ME): } ME = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (P_j - O_j)$$

$$(2) \text{误差均方根 (RMSE):}$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (P_j - O_j)^2 \right]^{0.5}$$

$$(3) \text{一致性系数 (AC):}$$

$$AC = 1 - \frac{N \cdot RMSE^2}{PE}$$

$$PE = \sum_{j=1}^n (|P_j - \bar{O}| + |O_j - \bar{O}|)^2$$

其中, N 、 P 、 O 分别为观察数、预测值、观测值。平均误差(ME)是对模型偏差的度量,值越小,说明模型预测偏差越小。误差均方根(RMSE)是对模型精确度和稳定性的度量,值小说明模型预测的精确度和稳定性越高。一致性系数(AC)是对模型预测值与实际值的吻合程度的度量,其值在0至1内变化,越接近1,模型预测值与实际值的吻合程度越高,反之则低^[15]。

2 结果与讨论

2.1 不同栅格分辨率DEM中提取地形因子的统计结果及频度分布

表1列出了4个地形因子的统计值。随着分辨率降低,各地形因子的平均值降低(汇流面积对数升高),最小值与最大值之差缩小,说明地形差异减小;标准差变小,说明地形平缓化,同时也说明地形差异缩小。这一变化规律可归因于低分辨率DEM对地形的平滑、综合作用^[11,22,23]。从表1中还可以看到,尽管高分辨率DEM详细地描述了地形特征,但同时也使得局部地形失真明显。例如表1中,随着分辨率升高,坡度最大值升高至58°,平面曲率、剖面曲率的最小值远小于 $-4(100\text{m})^{-1}$,最大值远大于 $4(100\text{m})^{-1}$ 。这是地形属性的算法所决定的,该算法基于邻域像素,当DEM分辨率变高时,地形属性的结果更易受DEM误差影响,从而出现异常值^[14]。

表 1 研究区内的地形因子统计

Table 1 Statistics of terrain attributes in the study area

栅格分辨率 Resolution	坡度 Slope (°)				平面曲率 Plan curvature ((100 m) ⁻¹)			
	平均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum	标准差 Std.	平均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum	标准差 Std.
5 m	4.20	0.00	58.90	4.23	0.013	-35.42	27.57	0.48
10 m	4.10	0.00	36.89	3.89	0.013	-7.37	6.76	0.34
15 m	3.97	0.00	25.13	3.59	0.012	-7.27	2.93	0.29
20 m	3.82	0.00	22.51	3.31	0.011	-3.68	2.25	0.26
25 m	3.66	0.00	18.36	3.05	0.010	-1.96	1.67	0.24
30 m	3.49	0.00	15.84	2.81	0.0086	-1.49	1.36	0.22

栅格分辨率 Resolution	剖面曲率 Profile curvature((100 m) ⁻¹)				比汇水面积对数 Natural logarithm of specific catchment area			
	平均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum	标准差 Std.	平均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum	标准差 Std.
5 m	0.012	-71.94	70.25	0.87	6.80	2.32	20.58	2.74
10 m	0.013	-17.42	19.27	0.54	7.06	3.32	19.59	2.74
15 m	0.012	-5.76	6.26	0.40	7.19	3.91	19.01	2.70
20 m	0.011	-4.86	5.08	0.32	7.35	4.32	18.60	2.66
25 m	0.009 3	-1.83	2.11	0.27	7.46	4.64	18.28	2.64
30 m	0.008 6	-1.64	1.87	0.23	7.54	4.91	18.02	2.57

图 2 显示了地形因子在不同分辨率 DEM 中的频度分布。在坡度的频度分布中 (图 2a), 当坡度在 0~1 时, 坡度的频度随分辨率降低而降低, 从 31.5% 分别降低至 28.7%、26.8%、25.3%、24.4%、23.8%, 降幅较小; 当坡度在 1~7 时, 其频度则随分辨率降低而增加, 增幅较大; 当坡度在 7~16 时, 其频度又随分辨率降低而降低, 降幅较小; 当坡度 >16 时, 其频度仍随分辨率降低而降低。这一变化趋势表明, DEM 分辨率降低使得平坡 (0~1°) 的频度减少, 微坡 (1~7°) 的频度增加, 而较缓坡 (7~16°) 及其他坡度 (>16°) 的频度降低。其他研究结果也表明, 随着 DEM 栅格分辨率降低, 坡度在低值区和高值区的频度降低, 在中值区的频度增加, 总体表现出向中值区集中的趋势^[9, 11~13]。

剖面曲率和平面曲率 (下文统称曲率) 的分布特征 (图 2b 和图 2c) 比较相似。当曲率值小于 $-2(100\text{ m})^{-1}$ 或大于 $2(100\text{ m})^{-1}$ 时, 5 m DEM 中的频度最高, 并且随着分辨率降低, 频度逐渐为 0; 当曲率值从 $-2(100\text{ m})^{-1}$ 增加至 $-1(100\text{ m})^{-1}$, 或从 $2(100\text{ m})^{-1}$ 降低至 $1(100\text{ m})^{-1}$ 时, 平面曲率的频度仍保持着随分辨率降低而降低的趋势; 剖面曲率的频度在 10 m DEM 中的增加较快, 并逐渐超过 5 m DEM, 其他分辨率 DEM 中没有明显变化; 当曲率值从 $-1(100\text{ m})^{-1}$ 增加至 $0(100\text{ m})^{-1}$, 或从

$1(100\text{ m})^{-1}$ 降低至 $0.5(100\text{ m})^{-1}$ 时, 曲率频度在不同分辨率 DEM 之间的差别很小; 当曲率值在 0 至 0.5 内时, 曲率频度在不同分辨率 DEM 中的差别很大, 表现出随分辨率降低, 频度增加的趋势。可见, DEM 分辨率降低对曲率分布的影响同坡度类似, 即在低值区和高值区的频度降低, 而在中值区增加, 即集中趋势。

在图 2(d) 中, 当比汇水面积对数小于 4 时, 其频度随 DEM 分辨率降低而降低, 直到分辨率降至 20 m 以下时, 频度为 0; 在比汇水面积对数从 4 增加至 6 的过程中, 其他分辨率的频度开始上升, 最大值出现在 20 m DEM 中, 最小值出现在 30 m DEM 中; 而当比汇水面积对数从 6 增加至 14 时, 其频度随分辨率降低而增加; 当比汇水面积对数增加至 14 以上时, 其频度又表现出随分辨率降低而降低的趋势。从中可以看出, 比汇水面积对数也具有与坡度和曲率一样的集中趋势。

以上分析表明, 本研究区内, 坡度、曲率、比汇水面积对数的频度均随着 DEM 栅格分辨率的降低而呈现出向其中值区集中趋势, 即地形因子在对应低值区和高值区的频度随着 DEM 分辨率降低而降低, 在对应中值区的频度则随着 DEM 分辨率降低而增加。

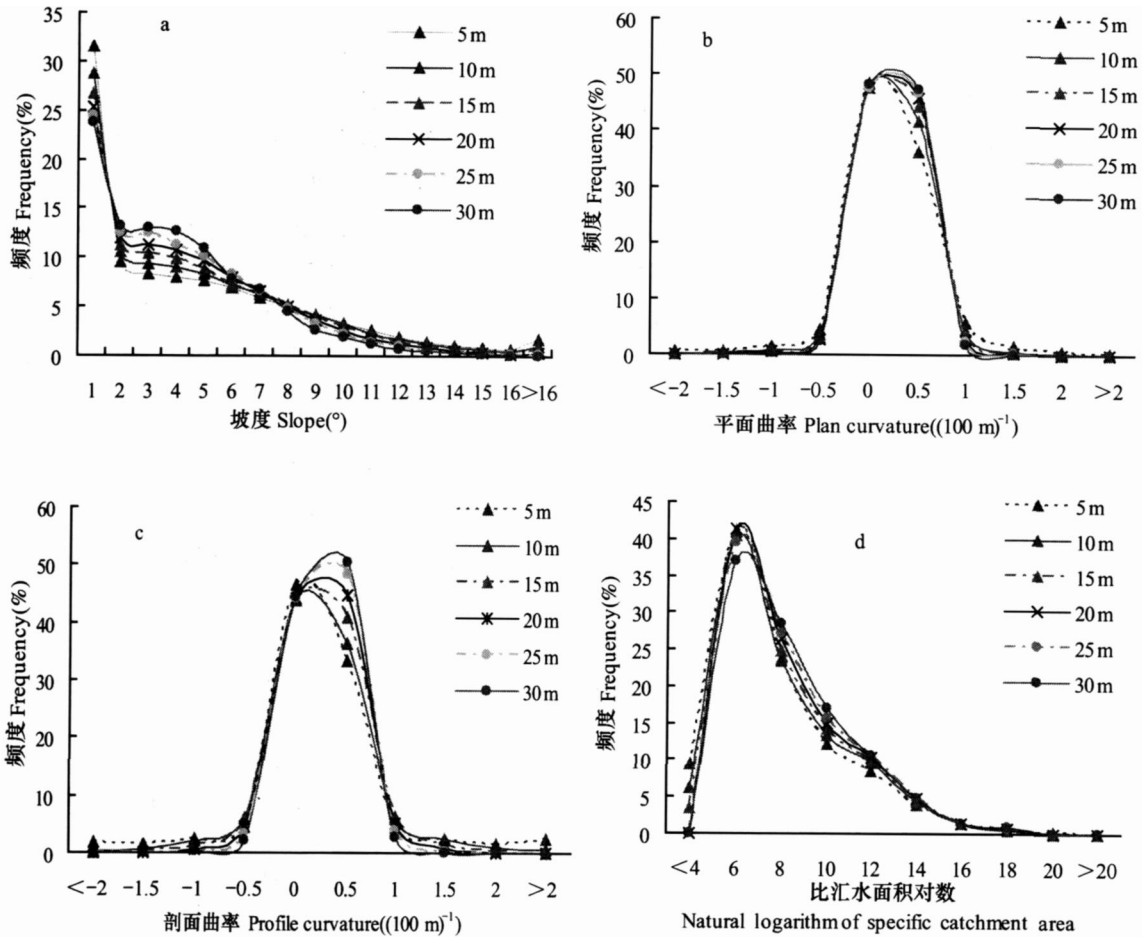


图 2 不同分辨率 DEM 中的坡度 (a)、剖面曲率 (b)、平面曲率 (c)、比汇水面积对数 (d) 的频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of slope gradient (a), profile curvature (b), plane curvature (c), natural logarithm of specific catchment area (d) of DEMs different in resolution

2.2 不同栅格分辨率 DEM 中的土壤—景观模型及其制图应用的精度

表 2 列出了多元线性逐步回归方法获得的土壤—景观关系模拟模型,模型中不含截距项,模型变量及 (校正) R^2 值均在 0.05 或更高水平上达到显著性 (未达到显著性水平的地形因子未列出)。除 30 m DEM 中的模型变量包含了平面曲率和径流强度系数外,其他 DEM 中的模型变量只包含了高程和坡度。而且,伴随着 DEM 分辨率降低,模型中高程的系数减小 (5 m 除外),坡度的系数增大,但减小和增大的幅度均较小。对比模型的 (校正) R^2 值可知,该值随着 DEM 分辨率的降低而增大,但增大的幅度很小。这些结果说明,DEM 分辨率降低对拟合土壤—景观模型并没有太大的影响,模型变量、变量系数、 R^2 在不同分辨率 DEM 中的差异很小,该结果与 Thompson 等^[9]的研究结果相似。

应用表 2 中的土壤—景观模型,对研究区的表

层有机质含量进行预测制图。对比验证点上的预测值和实际值,可以评价模型预测制图的精度 (表 2)。平均误差 (ME) 均为负值,说明模型的制图结果在总体上较实际值偏小,偏差由大到小的顺序为 (以 DEM 分辨率表示): 5 m > 30 m > 15 m > 25 m > 20 m > 10 m。误差均方根 (RMSE) 说明了模型预测制图的精确度和稳定性,该值由大到小的顺序与平均误差相同。一致性系数 (AC) 反映的是预测值与实际值的吻合程度,该值由小到大的顺序为 (以 DEM 分辨率表示): 30 m < 5 m < 10 m < 20 m < 15 m < 25 m。从这些指标中可以看出,土壤—景观模型的制图精度在不同分辨率 DEM 中的差异较大,在 10~25 m DEM 中的预测制图效果较好,而在更高分辨率 (5 m) 或更低分辨率 (30 m) DEM 中的效果较差。

总结以上分析可知,在本研究区内,DEM 栅格分辨率对土壤—景观模型的影响较小,而对其

制图应用的影响较大。分辨率对土壤—景观模型的影响可归结为两方面的原因,一是研究区的地形特征决定了该区土壤表层有机质含量主要受高程和坡度影响,因而模型中的变量均以高程和坡度为主^[12];二是构建模型的数据源在不同分辨率 DEM 中的差异较小,线性模型所依据的最小二乘法原理对这种较小的变异不敏感,因而模型变量的系数及 R^2 在各个 DEM 中的变化较小^[9]。分辨率对土壤—景观模型制图应用的影响则可能是栅格分辨率对地形因子的影响造成

的(见本文 2.1 节),具体表现为 DEM 栅格在表达地形时的综合(栅格尺寸较大)或细化(栅格尺寸较小)作用。当栅格尺寸较大时,如 30 m,则 30 m 范围内的地形属性被认为是相同值,显然这种综合作用忽视了这 30 m 范围内的变异,导致误差增大;当栅格尺寸较小时,如 5 m,则一定范围内(5 m 以外)的地形属性被认为是多个不同的值,这种细化作用会带来多因素的误差,多个误差经累积后同样导致了误差增大。这一影响机理还有待更为细致深入的研究。

表 2 拟合的土壤—景观模型及其在制图应用中的精度

Table 2 Fitted soil-landscape models and their accuracy in mapping

栅格分辨率 Resolution	变量高程的系数 Parameter of elevation (m)	变量坡度的系数 Parameter of slope (°)	变量平面曲 率的系数 Parameter of plan curvature ((100 m) ⁻¹)	变量径流强度 系数的系数 Parameter of stream power index	校正相关 系数 Adj- R ²	平均误差 ME (g kg ⁻¹)	误差 均方根 RMSE	一致性 系数 AC
5 m	0.269 9***	0.462 0*	-	-	0.925 2***	-4.38	6.56	0.465 2
10 m	0.266 9***	0.496 1*	-	-	0.925 7***	-1.47	4.74	0.529 8
15 m	0.252 4***	0.666 7*	-	-	0.926 4***	-2.21	5.29	0.544 3
20 m	0.249 9***	0.716 0*	-	-	0.927 6***	-1.71	4.96	0.543 5
25 m	0.225 8***	1.005 6*	-	-	0.929 9***	-1.92	4.99	0.601 1
30 m	0.272 8***	-	9.455 6*	0.221 2*	0.931 0***	-2.27	5.58	0.414 3

*显著性水平为 0.05 Significant at the 0.05 level; **显著性水平为 0.01 Significant at the 0.01 level; ***显著性水平为 0.0001 Significant at the 0.0001 level; 部分数值保留 4 位有效数字 Some values keep 4 effective digits

3 结 论

在本研究区内,随着 DEM 分辨率降低,DEM 描述的地形在平滑、综合作用下,总体差异缩小,趋于平缓;坡度、剖面曲率、平面曲率、比汇水面积对数的频度都在对应的低值区和高值区降低,而在对应的中值区增加,表现出在中值区集中趋势。

地形因子的这一变化规律,对线性土壤—景观模型的影响较小,但对其制图应用的影响较大。研究结果表明,不同栅格分辨率 DEM 中的土壤—景观模型在变量、变量系数及 R^2 上的差异很小,但在制图应用的准确度上有较大差异,其中较高的准确度出现在 10~25 m DEM 中,而更高分辨率(5 m)或更低分辨率(30 m)DEM 中的准确度较差。但 DEM 栅格分辨率对模型制图应用的影响机理还有待更加细致深入的研究。另外,本研究以亚热带丘陵地区为研究对象,且基于小范围土壤调查,对其他亚热带丘陵地区的类似研究具有一定指示意义,但其他地形特征或大区域范围土壤调查则还需要深入研究。

参 考 文 献

- [1] Huggett R J. Soil landscape systems: A model of soil genesis *Geodema*, 1975, 13: 1~22
- [2] Hewitt A E. Predictive modelling in soil survey. *Soils and Fertilizers*, 1993, 56: 305~314
- [3] Hudson B D. Concepts of soil mapping and interpretation. *Soil Survey Horizons*, 1990, 31: 63~73
- [4] Hudson B D. The soil survey as paradigm-based science. *Soil Science Society of American Journal*, 1992, 56: 836~841
- [5] McBratney A B, Mendonca Santos M L, Minasny B. On digital soil mapping. *Geodema*, 2003, 117: 3~52
- [6] Scull P, Franklin J, Chadwick O A, et al. Predictive soil mapping: A review. *Progress in Physical Geography*, 2003, 27: 171~197
- [7] Bishop T F A, McBratney A B. A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps. *Geodema*, 2001, 103: 149~160
- [8] Bourennane H, King D, Couturier A. Comparison of kriging with extent drift and simple linear regression for predicting soil horizon thickness with different sample densities. *Geodema*, 2000, 97: 255~271
- [9] Thompson J A, Eugenia M, Pena Y, et al. Soil-landscape modeling across a physiographic region: topographic patterns and model transportability. *Geodema*, 2006, 133: 57~70

- [10] Chaplot V, Walter C, Curni P. Improving soil hydromorphy prediction according to DEM resolution and available pedological data. *Geoderma*, 2000, 97: 405 ~ 422
- [11] Thompson J A, Bell J C, Butler C A. Digital elevation model resolution: Effect on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. *Geoderma*, 2001, 100: 67 ~ 89
- [12] Smith M P, Zhu A X, Burt J E, *et al*. The effects of DEM resolution and neighborhood size on digital soil survey. *Geoderma*, 2006, 137: 58 ~ 69
- [13] Tang G A. A Research on the Accuracy of Digital Elevation Models. Beijing and New York: Science Press, 2000
- [14] Shary P, Sharaya L, Mitysov A. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, 2002, 107: 1 ~ 32
- [15] Zhu A X, Band L, Vertessy R, *et al*. Derivation of soil properties using a soil land inference model (SoLIM). *Soil Science Society of American Journal*, 1997, 61: 523 ~ 533
- [16] 朱阿兴, 李宝林, 杨琳, 等. 基于 GIS、模糊逻辑和专家知识土壤制图及其在我国应用前景. *土壤学报*, 2005, 42(5): 844 ~ 851. Zhu A X, Li B L, Yang L, *et al*. Predictive soil mapping based on a GIS expert knowledge, and fuzzy logic framework and its application prospects in China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5): 844 ~ 851
- [17] Florinsky IV, Eilers R G, Manning G R, *et al*. Prediction of soil properties by digital terrain modeling. *Environmental Modeling & Software*, 2002, 17: 295 ~ 311
- [18] 邓慧平, 李秀彬. 地形指数的物理意义分析. *地理科学进展*, 2002, 21: 103 ~ 110. Deng H P, Li X B. Relationship of upslope contribution area and soil water content in TOPOMODEL (In Chinese). *Progress in Geography*, 2002, 21: 103 ~ 110
- [19] 秦承志, 李宝林, 朱阿兴, 等. 水流分配策略随下坡坡度变化的多流向算法. *水科学进展*, 2006, 17: 450 ~ 456. Qin C Z, Li B L, Zhu A X, *et al*. Multiple flow direction algorithm with flow partition scheme based on downslope gradient (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2006, 17: 450 ~ 456
- [20] 秦承志, 朱阿兴, 李宝林, 等. 基于栅格 DEM 的多流向算法述评. *地学前缘*, 2006, 13: 91 ~ 98. Qin C Z, Zhu A X, Li B L, *et al*. Review of multiple flow direction algorithms based on gridded digital elevation models (In Chinese). *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(3): 91 ~ 98
- [21] Moore ID, Gessler P E, Nielsen G A, *et al*. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of American Journal*, 1993, 57: 443 ~ 452
- [22] 汤国安, 赵牡丹, 李天文, 等. DEM 提取黄土高原地面坡度的不确定性. *地理学报*, 2003, 58: 824 ~ 830. Tang G A, Zhao M D, Li T W, *et al*. Modeling slope uncertainty derived from DEMs in Loess Plateau (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58: 824 ~ 830
- [23] 王妍, 刘洪斌, 宁茂歧. 栅格 DEM 的水平分辨率对地形信息的影响分析. *测绘与空间地理信息*, 2005, 28: 41 ~ 44. Wang Y, Liu H B, Ning M Q. Effect of horizontal resolution of raster DEM on landform information (In Chinese). *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2005, 28: 41 ~ 47

EFFECTS OF DEM RESOLUTION ON MULTI-FACTOR LINEAR SOIL-LANDSCAPE MODELS AND THEIR APPLICATION IN PREDICTIVE SOIL MAPPING

Sun Xiaolin^{1,2} Zhao Yuguo^{1†} Qin Chengzhi³ Li Decheng¹ Zhao Liang^{1,4} Zhang Ganlin¹

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(4 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210008, China)

Abstract In order to investigate effects of DEM resolution on soil-landscape models and their application in predictive soil mapping, multi-factor linear soil-landscape models were built up based on DEMs, varying in resolution, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, and 30 m, of the studied zone (4 km × 3 km) a typical subtropical hilly area, and then applied to predictive mapping of organic matter content in top soil. Results indicated, slope, curvatures, natural logarithm of specific catchment area tended to concentrate with the decrease in DEM resolution. The variation of terrain attributes didn't affect much on the simulation coefficients of the models, but it did accuracy of the models in predictive mapping. All the indexes demonstrate that the model was higher in mapping accuracy when the DEM resolution was 10 ~ 25 m than when it was others. The findings may be extrapolated to other subtropical hilly areas.

Key words DEM resolution; Soil-landscape modeling; Soil mapping; Soil Organic matter; Terrain attributes