

区域土壤质地层次三维空间分布的地统计模拟方法比较^①

贺 勇¹, 胡克林^{1*}, 李保国¹, 黄元仿¹, Deli Chen²

(1 中国农业大学土壤和水科学系, 教育部植物-土壤相互作用重点实验室, 北京 100193;

2 澳大利亚墨尔本大学土地和食品学院, 澳大利亚维多利亚 3052)

摘 要: 为了量化描述冲积平原区土壤剖面质地层次的复杂变异性, 本研究根据华北冲积平原一块面积约 15 km²区域内的 139 个土壤剖面 (0~2 m) 观测数据, 分别应用顺序指示模拟和多点地统计学模拟方法分析了区域内土壤质地层次的三维空间分布特征。前者的结果显示土壤质地层在水平方向上的分布具有很强的随机特性, 而后者结果表明土壤质地层在水平方向上的分布具有一定的规律性。将转移概率函数得到的各向同性分布比例和各向异性平均长度 (厚度) 用来生成三维训练图像, 然后将生成的训练图像用于多点地统计学模拟, 并与传统的顺序指示模拟结果进行了对比。结果表明, 多点地统计学模拟在估计精度以及垂直方向上土壤质地层次连贯性的再现性上优于传统顺序指示模拟, 所得结果能更好地反映土壤质地层次的空间分布特征。

关键词: 区域尺度; 土壤质地层次; 三维; 顺序指示模拟; 多点地统计学模拟

中图分类号: S152.7

土壤质地层次的空间分布十分复杂。典型的土壤剖面只能代表有限的区域, 很难将其扩展到更大的研究区域^[1]。在传统的土壤分类制图过程中, 土壤制图者常根据其经验将有限的土壤观测剖面扩展到整个研究区。然而, 当外界成土环境条件复杂多变导致研究区的土壤质地层次空间变异较大时, 土壤制图者需要消耗大量的人力物力来获取更多的土壤剖面资料, 这常常是不切实际的。由于土壤质地层次在土壤科学和农业生产实践中具有很重要的意义^[2], 因此, 有必要探求精确量化的方法来描述土壤质地层次的空间分布。

目前, 用于模拟指示变量 (如岩石层或质地层) 的主要方法是基于变异函数的两点地统计模拟 (如顺序指示模拟)^[3-7]。这种方法不仅考虑到了样点数据的空间结构特征, 而且能体现未采样点的空间变异性^[8]。因此, 广泛地用于 2-D 土壤制图^[9]和 3-D 土壤性质模拟^[10-11]。然而, 对于具有较高连贯性的土壤变量 (如土壤质地层), 基于变异函数的条件模拟结果常表现出高熵或低连贯性^[12-13]。而且, 当数据稀疏时, 变异函数常表现为纯块金效应或具有很高的随机特性^[8, 13-14]。这种情况下进行条件模拟, 无法体现变异函数

的优点。此外, 传统的变异函数虽然可以反映空间上两点之间的相关性, 但难于表征复杂的空间结构和再现复杂目标的几何形态^[15]。

鉴于上述传统建模方法的不足, 近年来一种用于模拟地质结构的新方法——多点地统计学模拟, 得以研究和发展^[15-17]。这种方法在一定程度上能够克服传统条件模拟中出现的高熵或低连贯性问题^[17]。但由于其算法上的缺陷, 未能在实际中推广应用^[15, 19]。Strebel 等^[16]在前人研究的基础上将算法加以改进, 提出了多点模拟的 SNES (single normal equation simulation) 算法。国内外很多学者应用该方法进行了实际建模, 并证明了点地统计模拟优于传统地质统计学建模方法^[15-16, 19-20]。然而到目前为止, 将此方法用于土壤剖面质地层次模拟的研究还少见报道。

因此, 本文选取了华北冲积平原一块面积约 15 km² 的区域, 分别运用指示变异函数和转移概率函数分析土壤质地层次在不同方向上的空间变异特性; 在此基础上, 分别运用顺序指示模拟和多点地统计学模拟方法对土壤质地层次进行三维模拟; 通过对模拟结果的检验, 评价这两种方法在区域土壤质地层次模拟的适用性。

①基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2009CB118607)、国家自然科学基金项目 (40401025) 和教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-07-0809) 资助。

* 通讯作者 (hukel@cau.edu.cn)

作者简介: 贺勇 (1980—), 男, 内蒙古人, 博士研究生, 主要从事土地利用与信息技术的研究。E-mail: hegaolyt@163.com

1 材料与方法

1.1 数据采集

研究区位于河北省曲周县一块面积约 15 km² 的区域,采取平行四边形网格化布点(GPS 定位),四边形边长 350 m,共布设 139 个点(图 1)。采取开挖剖面 and 钻孔剖面相结合的方法,观测土壤剖面质地层次的变化。观测深度为 2 m,质地层次厚度的观测精确到 1 cm,记录间隔为 5 cm。质地层次厚度 < 2.5 cm 的忽略。土壤中几乎没有 > 1 mm 粒径的颗粒,且不同质地层次分层较为明显。参考卡庆斯基土壤质地划分标准,并根据中国现行土壤质地分类制,将土壤质地层次划分为 5 种,分别为:砂土、砂壤、轻壤、中壤和黏土,其中重壤比例很小合并到黏土类^[21]。

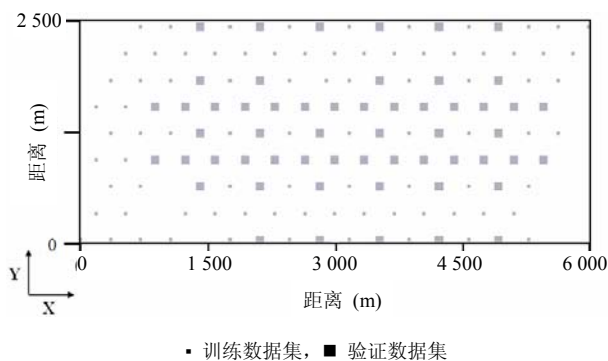


图 1 土壤剖面采样点分布图

Fig. 1 Distribution map of soil profiles in study area

1.2 地统计学方法

1.2.1 指示变异函数 关于指示变异函数的基本原理和方法在许多文献中都有详细介绍^[22-24],其计算公式如下:

$$\gamma_I(h; z_k) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [I(u+h; z_k) - I(u; z_k)]^2 \quad (1)$$

其中, $I(u; z_k)$ 为种类 k 在位置 u 处的指示变量, h 为步长, $N(h)$ 为间隔为 h 的数据点对数。

1.2.2 顺序指示模拟 (sequential indicator simulation, SIS) 对于种类变量, SIS 通过指示克里格来推断种类变量 $Z(u)$ 的概率密度分布函数^[24]。通过随机模拟,可以得到某一种类变量 $Z(u)$ 分布的一系列等概率实现。例如,如果在位置 u 处模拟得到 $Z(u)$ 属于种类 k , 其对应的概率密度函数便为 $\text{Prob}\{I(u)=1 | (n)\} = E\{I(u) | (n)\}$ 。设 $i(u; z_k)$ 为种类变量 z_k 的指示函数,如果满足 $u \in z_k$, 其值为 1, 否则为 0。使用简单克里格估计变量 z_k 在 u 处的概率为:

$$\text{Prob}^*\{I(u; z_k) = 1 | (n)\} = p_k + \sum_{a=1}^n \lambda_a [I(u; z_k) - p_k] \quad (2)$$

其中 $p_k = E\{I(u; z_k)\} \in [0, 1]$ 为种类 z_k 的边缘分布频率;

λ_a 为简单克里格系统的权重系数。SIS 的具体步骤可参阅文献^[24]。

1.2.3 转移概率函数 转移概率函数是基于转移概率的空间度量方法,可直观地用于描述多变量系统中各变量的空间分布特征以及变量之间的关系。转移概率函数 $t_{jk}(h)$ 可定义为连续转移概率与空间步长的关系。其中:

$$t_{jk}(h) = \text{Pr}\{k \text{ 在 } x+h \text{ 处发生} | j \text{ 在 } x \text{ 处发生}\} \quad (3)$$

式中, k 和 j 为种类变量, x 为空间位置矢量, h 为分隔矢量, Pr 表示概率。如 k 和 j 分别表示不同的质地层, 则 $t_{jk}(h)$ 则表示不同质地层次间的转移概率。

理想状态下的自转移概率函数 $t_{jj}(h)$ 从 (0, 1) 点出发, 逐渐降低到一个稳定的值——基台 (图 3 中水平灰线)^[25]。根据转移概率函数曲线, 可以得到其两个重要的参数——分布比例和平均长度。

某一变量的分布比例 p_k 可用于反映其在整个研究区所占的体积百分比, 可表示为:

$$\lim_{h \rightarrow \infty} t_{jk}(h) = p_k \quad (4)$$

平均长度常用来表征变量的空间连贯性, 某一变量 k 在 ϕ 方向上的平均长度 $L_{k,\phi}$ 等于其在 ϕ 方向上的总长度 $L_{k,\phi}$ 除以发生的总次数 N ^[26]。数学上, 过 (0, 1) 点作转移概率曲线的切线与横坐标的交点即为变量 k 的平均长度^[11] (图 3 中虚线)。

1.2.4 多点地统计学模拟 多点地统计学模拟 (以 SNES 为例) 应用多点数据样板 T_i 扫描训练图像以构建搜索树, 并从搜索树中求取条件概率分布函数^[12]:

$$\text{Prob}(Z(u) = k | d_n) \quad (5)$$

与样板 T_i 相关的数据事件 d_n 的发生概率可在训练图像中通过计算训练比例 $c_k(d_n)/c(d_n)$ 来推断:

$$\text{Prob}(Z(u) = k | d_n) = c_k(d_n) / c(d_n) \quad (6)$$

其中, $c(d_n)$ 为训练图像中与条件数据相同的事件数, $c_k(d_n)$ 为与中心值 $Z(u)$ 相同的事件数。SNES 的具体步骤可参阅文献^[30]

1.3 数据处理与结果验证

如图 1 所示, 本文将 139 个实测剖面分为训练数据集 (83 个剖面) 和验证数据集 (56 个剖面)。应用斯坦福大学开发的 SGeMS v2.1 软件进行实验指示变异函数的计算、理论模型的拟合、训练图像的生成以及多点地统计学模拟 (SNES)。应用 Carle 开发的 T-PROGS 软件进行转移概率函数的计算和转移概率函数模型的拟合^[11]。

本文选用两个指标对模拟结果进行验证, 分别为各土壤质地层次的预测精度和垂直方向上各质地层次模拟结果空间连贯性的再现性。其中, 将所有条件模拟实现的概率分布与验证数据集的匹配度 θ_i 对预测精度来进行判断:

$$\theta_i = \frac{n_i(P > 0.4)}{N_i} \quad I = 1 \dots k \quad (7)$$

式中, n_i 为模拟结果中某质地层次 i 的概率分布大于某阈值且与验证数据集相匹配的点数, N_i 为某种质地总的模拟点数。对 20 次模拟结果的最大概率分布进行赋值, 然后在与采样尺度相近的 $32 \times 10 \times 40$ ($X \times Y \times Z$)

的网格数上提取模拟值, 生成新的数据集。计算此数据集垂直方向上的空间连贯性, 并与实测训练数据集进行对比, 来判断其再现性的好坏。对比时, 选用相对误差 (δ):

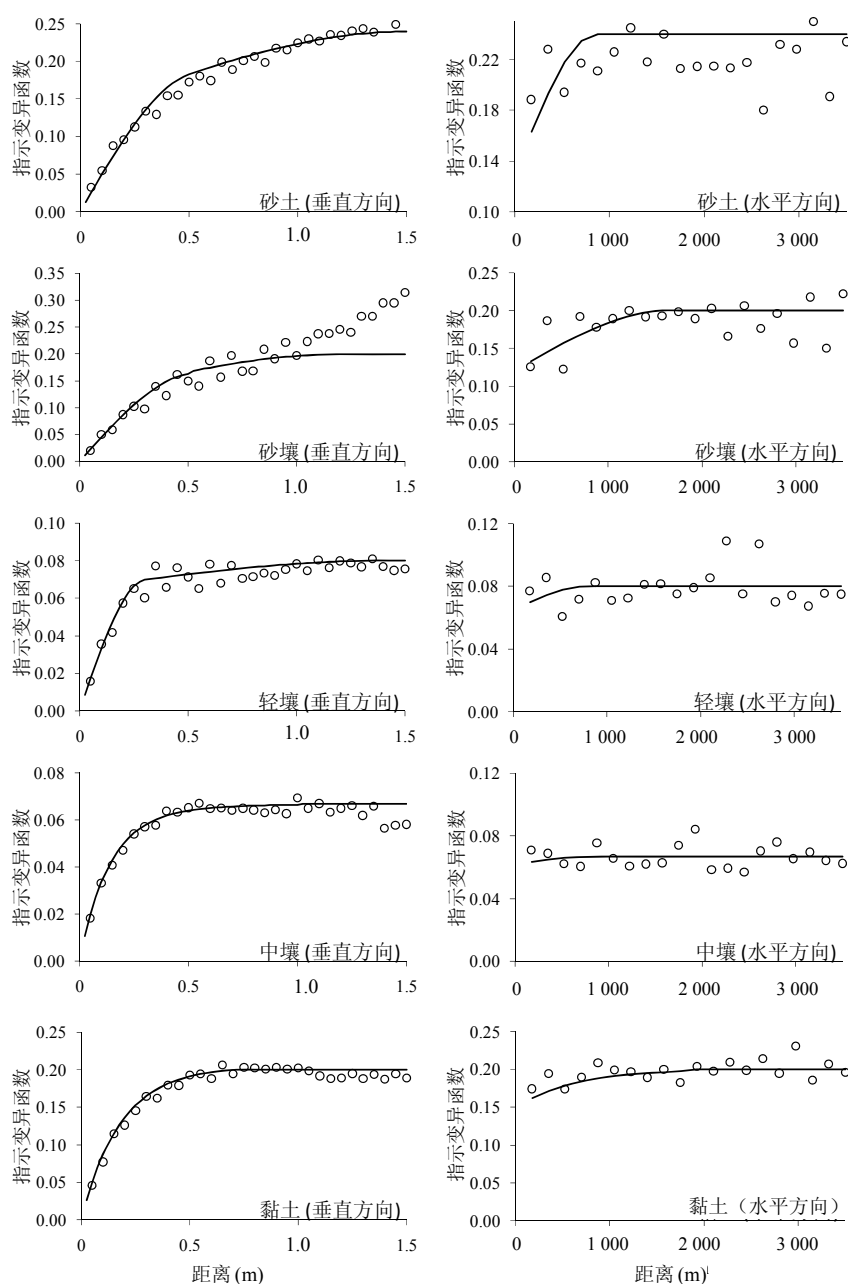
$$\delta = \frac{|\varepsilon_p - \varepsilon_o|}{\varepsilon_o} \times 100\% \quad (8)$$

式中, ε_o 和 ε_p 分别为实测值和模拟值。

2 结果与分析

2.1 指示变异函数分析

每种质地垂直方向 (Z) 和水平方向 (X, Y) 上的指示变异函数结果如图 2 所示, 计算步长与采样间



2 各质地的指示变异函数 (点) 和相应的拟合模型 (实线)

Fig. 2 Experimental indicator variograms (points) and corresponding fitted models (solid lines) for each texture category

隔相等。由于 Y 方向上数据相对稀疏, 计算时发现 Y 方向与 X 方向以及 X-Y 对角线 45° 方向上的变异函数非常相似, 因此, 可以假定水平方向上的变异函数是各向同性的, 这与在其他沉积变量 (如地质层) 上的研究结果是相似的^[27]。

表 1 中 C_0 为块金值, $C_0 + C_1 + C_2$ 为基台值, α_1 和 α_2 为不同尺度下的变程, SH 为块金值与基台值的比值, 所有变异函数的最佳模型均为球状模型。其中, SH 可用来表征变量的空间异质性^[28]。 SH 接近 0 表示变量具有较强的空间自相关性, 接近 1 则表示其具有

较强的空间变异性或块金效应。从图 2 和表 1 可以看出, 在垂直方向上, 土壤质地的 SH 值均为 0, 说明研究区土壤质地呈现有规则的沉积特点, 而水平方向上土壤质地表现出较强的随机特征, 如轻壤和中壤的 SH 值都 >0.8 , 这反映出在水平方向上土壤质地的形成环境较为复杂, 另外, 在本研究中水平方向上采样间隔过大 (数据稀疏) 也可能是导致土壤质地的变异函数表现出较高随机特征的另一个主要原因^[9,14,29]。说明在 SH 值很大的情况下, 变异函数很难准确把握土壤质地的空间变化特征。

表 1 垂直和水平方向上 5 种质地层的指示变异函数

Table 1 Indicator variogram models of five texture layers in vertical and horizontal directions

土壤质地	垂直方向						水平方向			
	C_0	C_1	$\alpha_1(\text{m})$	C_2	$\alpha_2(\text{m})$	SH	C_0	C_1	$\alpha_1(\text{m})$	SH
砂土	0	0.13	0.5	0.1	1.2	0	0.13	0.1	2 100	0.57
砂壤	0	0.12	0.5	0.08	1.3	0	0.12	0.08	2 200	0.60
轻壤	0	0.065	0.3	0.015	1.3	0	0.065	0.015	1 100	0.81
中壤	0	0.06	0.3	0.027	0.8	0	0.06	0.027	2 100	0.69
黏土	0	0.15	0.35	0.055	0.9	0	0.15	0.055	1 008	0.73

2.2 转移概率函数分析

分别计算了垂向 (Z) 和水平方向上 (X,Y) 的自转移概率函数 (图 3)。计算步长与采样间隔相等, 同样假设水平方向上转移概率函数是各向同性的。

与变异函数相似, 转移概率函数可以由分布比例和平均长度来描述。如表 2 所示, 从各向同性分布比例可以看出, 砂土、砂壤和黏土是研究区的主要质地层, 分别占到了质地层总数的 30.8%、25.2% 和 26.5%。而轻

壤和中壤只占很少的部分, 分别为 8.5% 和 9.0%。砂土在垂直方向上的平均长度大于其他质地层, 说明砂土层在垂直方向上的分布较为连续, 具有较强的连贯性, 而其他质地层的分布相对离散一些。同样, 在水平方向, 砂土的平均长度大于其他质地层, 这说明砂土在整个研究区三维空间中的分布非常广泛且较为连续。由上分析可知, 转移概率函数的两个参数与变异函数的参数相比, 可以更直观地反映出变量的空间分布特征。

表 2 质地层的各向同性分布比例和各向异性平均长度

Table 2 Isotropy proportions and anisotropy mean lengths of different soil textures

参数	方向	砂土	砂壤	轻壤	中壤	黏土
分布比例	各向同性	0.308	0.252	0.085	0.090	0.265
平均长度(m)	垂直方向	0.650	0.400	0.253	0.248	0.291
	水平方向	600	480	110	300	365

2.3 顺序指示模拟 (SIS) 实现

SIS 模拟是在 $35 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 0.025 \text{ m}$ 的网格单元上进行的, 模拟实现的网格总数为 680 000。应用之前得到的变异函数模型, 共得到 20 次 SIS 实现, 并根据其概率分布进行了后处理。从图 4A 可以看出, 模拟结果与实测土壤剖面的空间分布在

整体趋势上是一致的。如图 4A 中的横断面所示, 当下层为黏土层时, 上层主要为砂壤层; 底层主要是黏土和砂土层; 轻壤和中壤在上层和下层都有出现, 但只占很小的部分; 在研究区东南角的表层 ($Z = 1.7 \sim 2.0/\text{m}$) 出现了一块较为集中的黏土层。

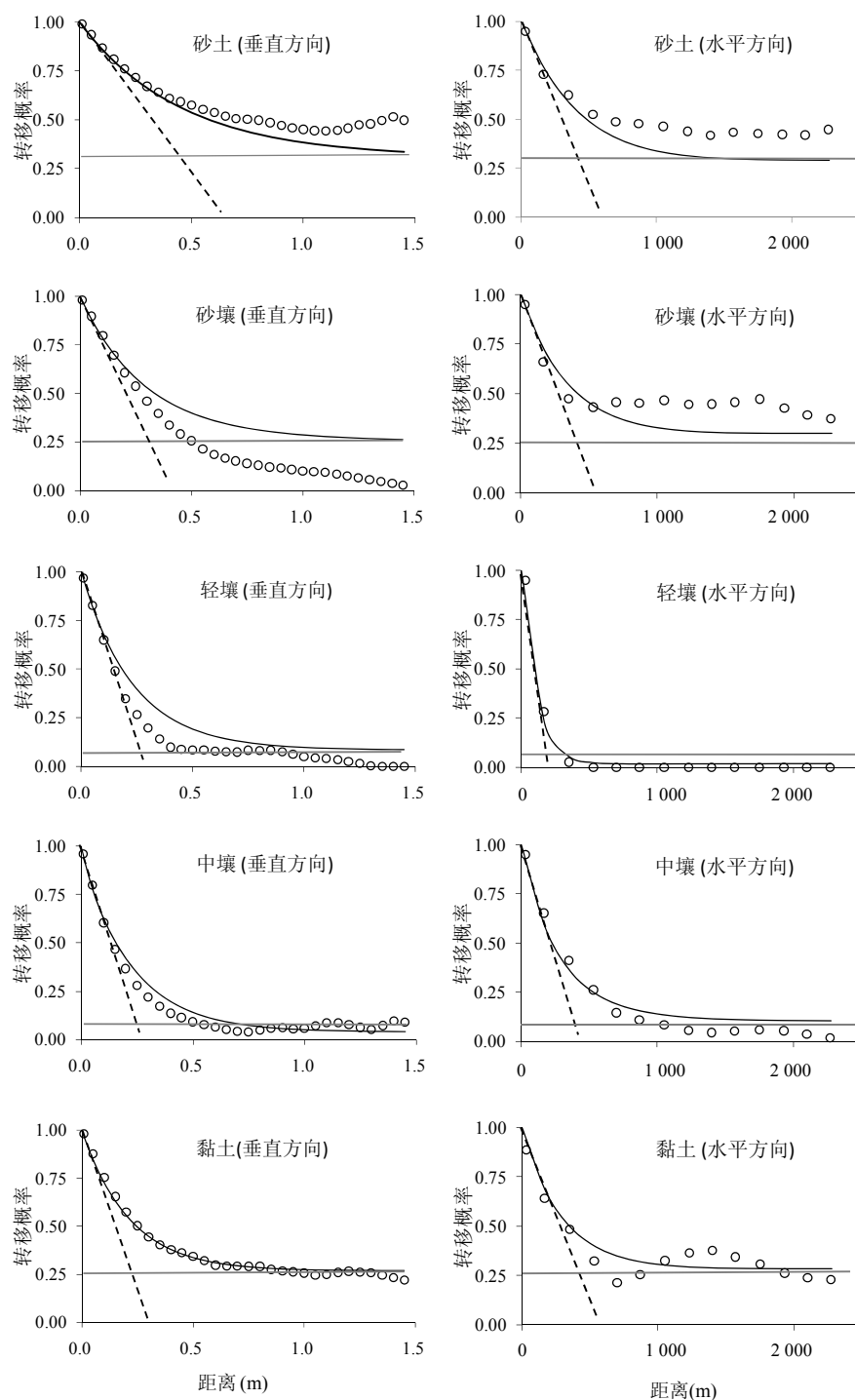


图3 实测转移概率函数(空心圆)及相应的拟合模型(实线)(图中水平灰色实线表示各向同性分布比例, 从(0, 1)点出发的虚线与横坐标的交点表示各质地层的平均长度)

Fig. 3 Matrix of transition probabilities showing soil profile data measurements (circles) and transiogram model (solid lines) for the study area (The fine solid horizontal lines indicate the sills which show the volumetric proportions of facies in each column, Intersection of the long-dashed line (tangent) with lag axes indicates mean lengths of each texture)

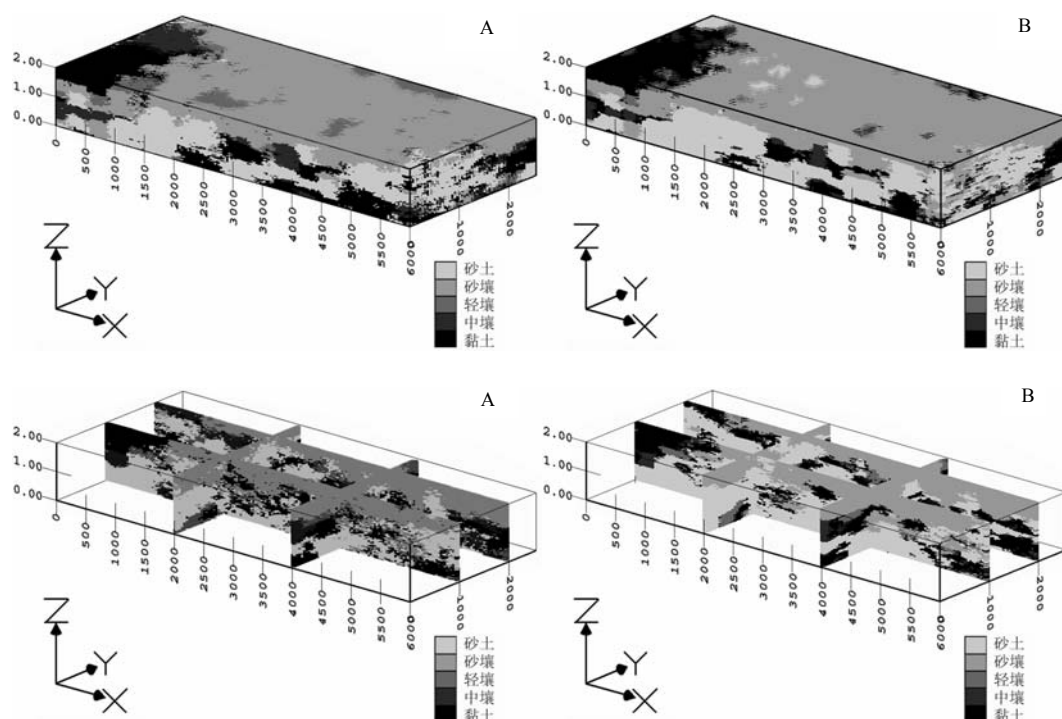


图 4 三维 SIS (A) 和 SNES (B) 模拟结果与它们相应的截面

Fig. 4 Three dimension realization by SIS (A) and SNES (B) and their corresponding cross-sections

2.4 多点地统计学模拟实现

在进行 SNES 模拟之前, 首先需要生成一个训练图像, 其作用相当于变异函数模型。将前面转移概率函数中得到的各土壤质地层的分布比例和平均长度作为输入参数, 且 5 种质地参数形状都采用 sinusoids, 各向异性的 sinusoids 轴与变异函数计算时相同。参照岩石层的定义, 将各质地层侵蚀标准都设为 0, 质地层层间叠加标准的最大值和最小值分别设为 0 和 1, 使用 SGeMS v2.1 软件中的 Tgenerator 模块生成训练图像^[30]。

训练图像在与 SIS 相同的模拟网格上进行 (图 5)。然后将生成的训练图像输入 SNES。SNES 同样在 SGeMS v2.1 中实现, 得到的模拟结果与训练图像规格相同, 关于 SNES 中各参数的详细介绍及设定标准可参考文献^[17]。

本文共得到 20 次 SNES 实现, 然后根据其概率分布进行了后处理 (如图 4B 所示)。为了把握质地层在研究区的空间结构特征, 模拟中使用多重网格模拟 (grid = 3), 同时以 servo 伺服系统 (0.5) 进行了概率校正。为了减少计算时间, 在搜索数据样板 T_i 时使用

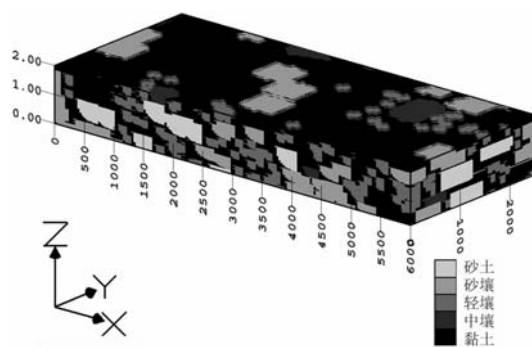


图 5 用于多点地统计学模拟的训练图像

Fig. 5 Training image used for the multiple-point analysis

60 个条件约束数据^[30]。将黏土设为背景种类, 方位角、倾角和倾斜度都设为 0。所有模拟实现的条件数据均为实测土壤剖面数据。从图 4B 可以看出, 模拟结果与实测土壤剖面数据 (图 1) 非常吻合。例如, 上层土壤主要以砂壤为主 (1.6 ~ 2.0 m), 而下层土壤主要以黏土为主。轻壤和中壤在整个土体中均有出现但只占很少的部分。在表层的西南角 ($Z = 1.7 \sim 2.0$ m) 同样以黏土层为主, 这与之前得到的 SIS 结构十分相似。

Hengl 等^[9]的研究结果表明, 在区域尺度上, 即使

土壤质地的估计看上去比较符合实际情况，其结果也未必很好。因此，需要定量化验证哪一种模拟结果更符合实际情况。

2.5 结果验证

对于一个具有 5 个变量的系统而言，当某一变量的概率分布 >0.4 ，说明此变量在研究区出现的可能很大^[9]。因此，本文选用 0.4 作为概率阈值，分别对 SIS 和 SNES 结果的预测精度进行比较。从表 3 可以看出，

就主要质地层（砂土、砂壤和黏土）而言，SNES 的预测精度较 SIS 都有所提高。如 SIS 模拟结果中，砂土和砂壤与验证数据集相匹配的比例 θ_i 分别为 51.6% 和 55.6%，而在 SNES 结果中，这两个结果分别达到了 58.0% 和 62.0%，这说明 SNES 能更好地忠实于实测数据^[9]。但对于研究区域所占比例较小的质地层（轻壤和中壤），两种模拟方法的预测精度都很差，说明这两种方法在小比例变量的模拟上还需进一步改进。

表 3 模拟结果的概率分布与验证数据集相匹配的百分比(概率阈值 $\tau > 0.4$)

Table 3 Percentage of probability distribution of simulation results that can match with validation dataset (probability threshold >0.4)

方法	砂土	砂壤	轻壤	中壤	黏土
SIS	51.6	55.6	13.2	6.6	33.4
SNES	58.0	62.0	8.8	7.4	34.0

从垂直方向上模拟的各土壤质地层空间连贯性的再现性及其对应的相对误差（表 4）来看，SNES 模拟的主要质地层（砂土和砂壤）的结果要好于 SIS，而对于小比例质地层（轻壤和中壤）来说，SIS 的结果反而好于 SNES。这可能是在生成的训练图像中小比例质地

层的数据事件太少而导致的，说明在多变量系统中，如何提高 SNES 中小变量的再现能力还需进一步的研究。考虑到小比例质地层的总和在研究区域的分布比例只占到 17.5%，总体来说，SNES 方法比 SIS 方法能更好地再现垂直方向上土壤质地层次的空间连贯性。

表 4 垂直方向土壤各质地层空间连贯性的再现性及其对应的相对误差 δ (%)

Table 4 Reproduction of proportion and connectivity in vertical direction and their corresponding relative errors δ

项目	砂土	砂壤	轻壤	中壤	黏土
实测值	0.65	0.40	0.25	0.25	0.29
SIS再现性	0.35	0.24	0.13	0.11	0.16
相对误差	46	40	49	56	45
SNES再现性	0.40	0.30	0.12	0.01	0.16
相对误差	38	25	52	96	45

3 结论

如果一种概念模型不能客观地反映变量的空间变异特征，它将很难为农业生产和环境管理提供有用的信息。基于此目的，本文根据实测土壤剖面质地数据，分别运用指示变异函数和转移概率函数分析了土壤质地层次在水平和垂直方向上的空间变异特性。结果表明，转移概率函数能够更好地反映土壤质地层次复杂的空间变异特征。将转移概率函数中得到的分布比例和平均长度用来生成三维训练图像，然后将生成的训练图像用于多点地统计学模拟（SNES），并与传统的顺序指示模拟（SIS）结果进行对比。结果表明，除所占比例较小的质地层（轻壤和中壤）模拟结果较差外，与 SIS 相比，SNES 在预测精度上有所提高。此外，由

于垂直方向上土壤质地层次空间连贯性的大小对土壤水肥气热都有直接的影响，本文也将其作为指标对模拟结果进行了验证。结果表明，除轻壤和中壤连贯性的再现性较差外，SNES 结果在整体上好于 SIS。因此，所得 SNES 结果能够为下一步农业生产和环境管理研究提供更合理的依据。

致谢：感谢留学基金委对本人在国外学习的资助。感谢美国 Weidong Li 博士为本文提供所需数据，同时感谢加拿大 Alberta 大学的 Yupeng Li 在算法实现上提供的帮助。

参考文献：

- [1] Zhang C, Li W. A comparative study of nonlinear Markov chain

- models for conditional simulation of multinomial classes from regular samples. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2008, 22: 217–230
- [2] 何同康. 稻田土壤的质地剖面类型及其在土壤基层分类和资源评价上的意义—以博罗县为例. *土壤*, 1984, 16(6): 219–222
- [3] Johnson NM, Dreiss SJ. Hydrostratigraphic interpretation using indicator geostatistics. *Water Resour. Res.*, 1989, 25(12): 2 501–2 510
- [4] Ritzi RWJr, Dominic DF, Brown NR, Kausch KW, McAlenney PJ, Basial MJ. Hydrofacies distribution and correlation in the Miami Valley aquifer system. *Water Resources Research*, 1995, 31(12): 3 271–3 281
- [5] Zhang J, Goodchild M. *Uncertainty in Geographical Information*. New York: Taylor and Francis, 2002
- [6] Goovaerts P. Estimation or simulation of soil properties? An optimization problem with conflicting criteria. *Geoderma*, 2000, 97: 165–186
- [7] Juang KW, Chen YS, Lee DY. Using sequential indicator simulation to assess the uncertainty of delineating heavy-metal contaminated soils. *Environmental Pollution*, 2004, 127: 229–238
- [8] Deutsch CV. A sequential indicator simulation program for categorical variables with point and block data: BlockSIS. *Computers & Geosciences*, 2006, 32: 1 669–1 681
- [9] Hengl T, Toomanian N, Reuter HI, Malakouti MJ. Methods to interpolate soil categorical variables from profile observations: Lessons from Iran. *Geoderma*, 2007, 140: 417–427
- [10] Bierkens MFP, Weerts HJT. Application of indicator simulation to modeling the lithological properties of a complex confining layer. *Geoderma*, 1994, 62: 265–284
- [11] 贺勇, 胡克林, 李卫东, 李保国. 华北冲积平原区土壤剖面质地层次空间分布的三维随机模拟. *土壤学报*, 2008, 45(2): 193–200
- [12] Bastante FG, Ordóñez C, Taboada J, Matías JM. Comparison of indicator kriging, conditional indicator simulation and multiple-point statistics used to model slate deposits. *Engineering Geology*, 2008, 98: 50–59
- [13] Goovaerts P. Impact of the simulation algorithm, magnitude of ergodic fluctuations and number of realizations on the spaces of uncertainty of flow properties. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1999, 13(3): 161–182
- [14] Esbensen KH, Friis-Petersen HH, Petersen L, Holm-Nielsen JB, Mortensen PP. Representative process sampling—in practice: Variographic analysis and estimation of total sampling errors (TSE). *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2007, 88: 41–59
- [15] 吴胜和, 李文克. 多点地质统计学—理论、应用与展望. *古地理学报*, 2005, 7(1): 137–144
- [16] Strebelle SB. Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics. *Mathematical Geology*, 2000, 34:1–22
- [17] Liu Y. Using the Snesim program for multiple-point statistical simulation. *Computers & Geosciences*, 2006, 32: 1544–1563
- [18] Ortiz JM and Deutsch CV. Indicator simulation accounting for multiple-point statistics. *Mathematical Geology*, 2004, 36(6): 545–565
- [19] 骆杨, 赵彦超. 多点地质统计学在河流相储层建模中的应用. *地质科技情报*, 2008, 27(3): 68–72
- [20] 冯国庆, 陈浩, 张烈辉, 李允. 利用多点地质统计学方法模拟岩相分布. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2005, 20(5): 9–11
- [21] Zhang C, Li W. Regional-scale modelling of the spatial distribution of surface and subsurface textural classes in alluvial soils using Markov chain geostatistics. *Soil Use and Management*, 2008, 24: 263–272
- [22] 周慧珍, 龚子同. 土壤空间变异性研究. *土壤学报*, 1996, 33(3): 232–241
- [23] 王政权. *地统计学及在生态学中的应用*. 北京: 科学出版社, 1999: 65–98
- [24] Deutsch CV, Journel AG. *GSLIB, Geostatistical Software Library and User's Guide*. New York: Oxford University Press, 1998: 43–62
- [25] Li W. Transiogram: A spatial relationship measure for categorical data. *International Journal of Geographical Information Science*, 2006, 20(6): 693–699
- [26] Lee SY, Carle SF, Fogg GE. Geologic heterogeneity and a comparison of two geostatistical models: Sequential Gaussian and transition probability-based geostatistical simulation. *Advances in Water Resources*, 2007, 30: 1 914–1 932
- [27] Falivene O, Cabrera L, Sáez A. Optimum and robust 3D facies interpolation strategies in a heterogeneous coal zone (Tertiary as pontes basin, NW Spain). *International Journal of Coal Geology*, 2007, 71: 185–208
- [28] Robertson GP, Crum JR, Ellis BG. The spatial variability of soil resources following long-term disturbance. *Oecologia*, 1993, 96: 451–456
- [29] Weissmann GS, Carle SF, Fogg GE. Three-dimensional hydrofacies modeling based on soil surveys and transition probability geostatistics. *Water Resources Research*, 1999, 35(6): 1 914–1 932

1 761–1 770

SGeMS.' Cambridge University Press, Cambridge, 2009:

[30] Remy N, Boucher A, Wu JB. 'Applied Geostatistics with

210–212

Applicability Comparison of Two Geostatistical Methods on Three Dimensional Simulation of Soil Textural Layers at Regional Scale

HE Yong¹, HU Ke-lin¹, LI Bao-guo¹, HUANG Yuan-fang¹, CHEN De-li²

(1 Department of Soil and Water Sciences, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2 School of Resource Management and Geography, Melbourne School of Land and Environment, The University of Melbourne, Victoria 3052, Australia)

Abstract: In order to describe quantitatively the highly spatial variability of soil profiles in alluvial soil, based on 139 observed soil profiles in a 15 km² region in North China Plain, indicator variogram and transiogram were used to analyze the spatial variability of five soil textural layers respectively. Results of indicator variograms showed that the soil textural layers in horizontal direction had strong stochastic character whereas the results of transiogram showed that the soil textural layers in horizontal direction had a certain degree of regularity. Indicator variogram model was used in Sequential Indicator Simulation (SIS). Three dimensional training image was created by using isotropy distribution proportion and anisotropy mean lengths obtained from transiogram, and then, the training image was used as input to multiple-point geostatistics simulation (MPS). The simulation results were validated and compared with traditional SIS method. Results showed that the MPS method is better than SIS method both in prediction accuracy and reproduction of connectivity of soil textural layers in vertical direction. The results, therefore, can better reflect the spatial character of soil textural layers.

Key words: Regional scale, Soil textural layers, Three dimension, Sequential Indicator Simulation, Multiple-Point Geostatistics Simulation