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*

贺 勇[1] 胡克林[1] 李卫东[2] 李保国[1†]
(1 中国农业大学土壤和水科学系, 北京 100094)
(2 Department of Geography, Kent State University, Kent, OH 44242, USA)

摘 要 土壤质地层次的空间分布(或土体构型)的复杂变异性是冲积土壤的典型特点之一, 定量描述土体构型对于土地利用和溶质运移研究来说极其重要。本研究根据华北冲积平原上一块面积约 15 km^{2}区域内的 139 个土壤剖面观测数据, 运用转移概率地统计学方法分析了区域内土壤质地层次空间分布的变异特性。结果表明, 土壤质地层次的空间分布不是纯随机的, 而是具有一定的空间毗邻转移趋势。将本文得到的土壤质地层次空间分布的三维马尔可夫链模型用于指示条件模拟后, 最终模拟结果反映了不同质地层次间的交叉协相关关系, 所得结果为进一步模拟水分溶质在区域土壤中的运动提供了有力的支持。

关键词 土壤质地层次; 转移概率; 三维马尔可夫链; 空间分布; 随机模拟
中图分类号 S152 文献标识码 A

土壤质地层次的空间分布, 尤其是轻重质地层次间的相互排列和某些障碍层的出现, 对水分转化和溶质运移等方面的研究具有重要的影响(1)。土壤质地层次在区域空间分布的变异不仅表现在层次排列的顺序上, 也表现在具体层次的厚度上。由于土壤质地层次的这种复杂空间分布, 仅仅通过有限的剖面数据难以准确地描述土壤质地层次的空间分布。另外, 对于土地管理和环境研究者来说, 详细了解土壤质地层次的空间分布也是至关重要的[1~6], 因此有必要发展合适的数学模型对其进行描述。

目前, 基于协方差变异函数的指示地统计学模型难以准确获得在数据稀缺情况下区域化变量的空间结构[7]。为了解决该问题, 近年来基于转移概率或马尔可夫链的模型被引入到地质统计学领域。马尔可夫链地统计模型采用转移概率作为指示变量来描述区域化变量的空间变化, 其描述能力强, 易于理解, 且有很好的随机理论支持[7,8]。在土壤科学中, Li 等[4]分别采用了由一般和嵌入马尔可夫链构建的一维模型模拟了土壤质地层次在区域尺度上的垂直变化特征。Weigand 等[9]运用基于转移率的马尔可夫链模型对土壤剖面进行了模拟, 但是采用该方法来研究土壤剖面质地层次的三维空间分布的研究还少见报道。本文试图运用由 Carle 等[7,8]和 Weissmann 等[10]提出的基于转移概率的地统计学方法来研究土壤质地层次的空间分布及其变化规律。作为案例研究, 本文选取了华北冲积平原一具有代表性的中尺度区域(约 15 km^2)。分别运用转移概率矩阵研究了不同方向(主要方向)土壤质地层次的空间变化规律, 在此基础上对土壤质地层次的空间分布进行了三维模拟。

1 材料与方法

1.1 研究区背景和数据采集

本文选取华北平原河北省曲周县东北部中国农业大学实验站(N 36°51′, E 115°0′)附近一带, 一块面积约 15 km^{2}的区域, 该区域内成土母质—砂、壤、黏分异明显, 各地貌部位的沉积物和地下水有明显的差别。表层土壤质地以轻砂土、重黏土和粉壤土为主[11]。

在研究区, 采取平行四边形网格化布点(采用 GPS 定位), 四边形边长 360 m, 共设 142 点。无法在

* 国家自然科学基金项目(40401025)、长江学者和创新团队发展计划(IRT0412)资助
† 通讯作者, E-mail: libg@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) 李卫东. 区域土壤剖面的随机模拟及其在土壤水转化上的应用. 中国农业大学博士学位论文, 1995
收稿日期: 2006-12-04; 收到修改稿日期: 2007-06-12

原剖面位置进行采样时, 则根据实际情况在该点附近 50 m 范围内取点。因村庄影响, 实测 139 个点。采取开挖剖面和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 1cm, 记录间隔为 5 cm。质地层次厚度小于 2.5 cm 的忽略。土壤中几乎没有大于 1 mm 粒径的颗粒, 且不同质地层次分层较为明显。参考前苏联土壤质地划分标准, 并根据中国现行土壤质地分类制, 将土壤质地层次划分为 6 种, 分别为: 重砂土、轻砂土、粉土、壤土、轻黏土和重黏土[12, 13]。

1.2 马尔可夫链模型

马尔可夫过程是随机过程理论的一种, 作为一种数学工具, 自 19 世纪苏联学者 Markov 提出至今, 已被广泛应用于各个领域。目前, 地球科学上常采用的马尔可夫链主要有三种类型, 分别为连续型、离散型和嵌入型马尔可夫链。由于连续马尔可夫链模型的函数表达具有连续性, 所以在描述同样具有连续属性的空间变量时应使用连续马尔可夫链模型。但是, 由于实测数据资料的限制, 实际的建模过程中常采用的是离散型和嵌入型马尔可夫链[7, 8, 14]。通过选取一定的空间步长 h, 用离散马尔可夫链可近似拟合连续空间, 得到理论上的近似数据; 也可通过嵌入马尔可夫链转移概率来近似描述连续空间分布。

当用于空间序列的研究时, 转移概率 $t_{jk}(h)$ 定义为

$$t_{jk}(h) = \Pr\left\{k \text{ 在 } x+h \text{ 处发生} \mid j \text{ 在 } x \text{ 处发生}\right\} \quad (1)$$

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。如在质地层次空间分布的马尔可夫模型中, k 和 j 分别表示不同的质地层次, 而 $t_{jk}(h)$ 则表示不同质地层次间的转移概率。

1.2.1 连续马尔可夫链　连续马尔可夫链转移概率矩阵的函数表达式为:

$$T(h_\phi) = \exp[R_\phi h_\phi] \quad (2)$$

其中, $T(h_\phi)$ 表示 N×N 阶转移概率矩阵, R_ϕ 为 ϕ 方向转移强度矩阵, 矩阵中的元素 $r_{jk,\phi}$ 描述了 ϕ 方向单位长度种类 j 至种类 k 的转移强度(或转移率)。当 $h=0$ 时, 转移强度与转移概率的关系为[7, 8]:

$$r_{jk,\phi} = \partial t_{jk}(0) / \partial h_\phi \quad (3)$$

理论上, 用连续马尔可夫链可获得任意步长(方向)的转移概率。

1.2.2 离散马尔可夫链　对于选定的步长, 一维离散马尔可夫链具有下面的性质:

$$T(n\Delta h_\phi) = T^n(\Delta h_\phi) \quad (4)$$

式中, n 步转移概率等于一步转移概率的 N 次幂, h 取决于采样间隔的大小。在构建马尔可夫链模型时, 选取合适的空间步长 h, 通过计算单位转移概率矩阵便可用离散马尔可夫过程来近似描述质地类型的空间分布。

在实际建模中, 由于缺乏连续性, 并受到采样间隔的限制, 通常用式(5)将离散型马尔可夫链转化为连续型马尔可夫链[14], 从而可以得到严格意义上的马尔可夫链模型。

$$R_\phi = \frac{\ln\{T(\Delta h_\phi)\}}{\Delta h_\phi} \quad (5)$$

1.2.3 嵌入马尔可夫链　在地质学上嵌入型马尔可夫链较为常用, 与基于时间(空间)序列的离散型马尔可夫链不同, 嵌入型马尔可夫链是基于事件序列的。比如在垂直方向, 定义嵌入马尔可夫链的转移概率为质地类型 j 分布在下面的前提下质地类型 k 分布在上面的概率, 即条件概率。例如, 垂直方向的嵌入转移概率可定义为:

$$\pi_{jk,z} = \Pr\{k \text{ 在 } j \text{ 上面发生} \mid j \text{ 发生}\} \quad (6)$$

式中, k 和 j 代表嵌入发生。地质模型中大多数马尔可夫链分析都是在嵌入的框架中进行的。对于非对角线上的元素, 连续型转移强度与嵌入型转移概率的关系为[15]:

$$r_{jk,\phi} = \frac{\pi_{jk,\phi}}{\bar{L}_{j,\phi}} \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 垂直和水平方向土壤质地层次的空间变化特征

应用马尔可夫链模型公式系统分别得到了垂直方向和水平方向质地层次分布的连续转移概率模型(图 1 和图 2)。马尔可夫链模型中的理论转移概率值与实测转移概率值之间的拟合效果与数据量和样本间距以及内在分布特性(如马氏性的强弱)有关。从图 1 看出, 曲周地区土壤质地层次的分布具较强的马氏性, 除轻砂土(第 2 列)的拟合效果不太理想外, 其余质地层次的理论转移概率与实测转移概率之间的拟合效果较好。模型中平稳性假设(即假定质地层次间的转移概率将会随着空间步长的变化达到一个平稳状态)可能是导致垂直方向轻砂土的模拟效果不好的原因。此外, 水平方向模型中轻砂土

的模拟效果也不太好(如图 2 中轻砂土向轻砂土自转移概率模拟值高于实测转移概率值), 这是由于假定水平方向与垂直方向分布比例相同所导致的。

无论数据丰富或稀缺, 与基于协方差函数的指示地统计学模型相比, 基于转移概率矩阵的马尔可夫链模型可直观地反映空间变量的分布比例、平均长度和毗邻迁移转化趋势[7, 15]。下面就用马尔可夫链模型中三个参数来分析研究区土壤质地层次的空间分布特征。

2.1.1　土壤质地层次的分布比例　　在有 k 种质地类型(或层次)的研究区域内, 各质地类型的分布比例计为 p_i, 则有 $\sum_{i=1}^{k} p_i = 1,\ i = 1,\ \cdots,\ k$。假设平稳, 由马尔可夫链的极限分布定理可知, 马尔可夫链的极限分布即为其平稳分布, 也即:

$$\lim_{h\to\infty} t_{jk}(h_\phi) = p_k \tag{8}$$

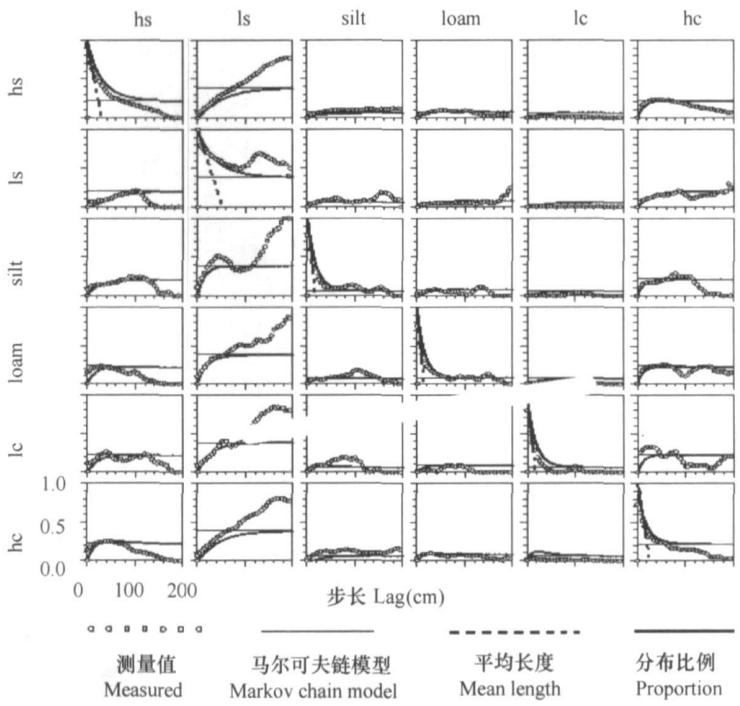
在转移概率地质统计学中, 分布比例实际上反映的是变量在研究区域所占的体积百分比。将土壤质地类型数据代入式(9)后, 经计算得到了各质地类型的分布比例, 如图 1 中水平细实线所示, 对角线上自转移概率达到稳定的基台值便为各质地类型在此区域所占的分布比例。研究区重砂土、轻砂土、粉土、壤土、轻黏土和重黏土的分布比例分别为 0.300、0.293、0.079、0.079、0.018 和 0.231(假定各向分布比例相同)。从分布比例的结果可以直观地看出, 研究区主要以重砂土、轻砂土和重黏土为主, 而粉土、壤土和轻黏土所占的比例非常小, 这与实际观测到的结果是一致的。

2.1.2　平均长度　　质地类型 k 的平均长度可由连续数据在 ϕ 方向上质地类型 k 的总长度除以 ϕ 方向质地类型 k 的嵌入发生总数得到。在图 1 和图 2 中对角线上质地类型的自转移达到平稳的"基台"时对应的横坐标为变程, 但这个变程不能直接说明某种质地类型尺寸的大小[16]。数学上, 平均长度与对角线转移概率的关系为:

$$\frac{\partial t_{kk}(0)}{\partial h_\phi} = -\frac{1}{\bar{L}_{k\phi}} \tag{9}$$

所以过(0, 1)点作转移概率曲线的切线与横坐标的交点即为质地的平均长度。将式(3)代入式(9)可直接得到转移强度与平均长度的关系为:

$$r_{kk,\phi} = -\left(1 / \bar{L}_{k,\phi}\right) \tag{10}$$



hs, ls, silt, loam, lc 和 hc 分别表示重砂土、轻砂土、粉土、壤土、轻黏土和重黏土

hs, ls, silt, loam, lc and hc denote heavy sand, light sand, silt, loam, light clay, heavy clay, respectively

图 1　垂直方向质地层次分布的实测转移概率矩阵与连续转移概率模型

Fig. 1　Matrix of measured vertical transition probability of soil texture layers and the Markov chain model

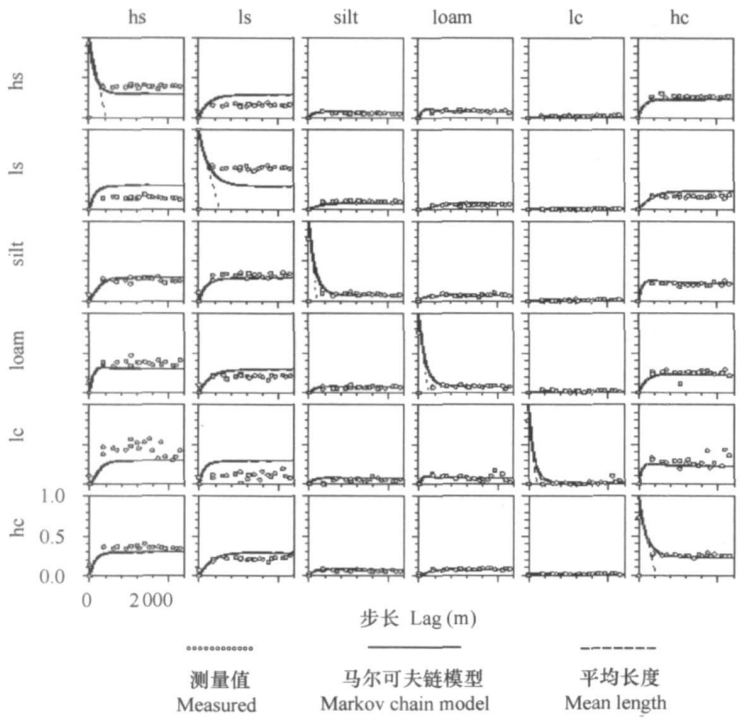


图 2 水平方向质地分布实测转移概率矩阵与连续转移概率模型

Fig. 2 Matrix of measured horizontal transition probability of soil texture layers and the Markov chain model

由于研究区土壤剖面资料原始数据中记录了垂直方向质地层次的厚度, 所以在这里用垂直方向质地类型 k 的总长度除以垂直方向质地类型 k 的嵌入发生总数来获取平均长度。计算得到的各质地类型重砂土、轻砂土、粉土、壤土、轻黏土和重黏土在垂直方向的平均长度分别为 48.5 cm、50.9 cm、26.4 cm、22.4 cm、27.7 cm 和 30.0 cm。

与垂直方向不同, 由于数据较为稀疏, 采样点之间间距较大, 直接用定义来获取水平方向的平均长度可能会带来很大的误差。所以用式(9)和(10)来估计水平方向质地层次的平均长度。在图 2 中过(0, 1)点作转移概率曲线的切线, 得到各质地类型重砂土、轻砂土、粉土、壤土、轻黏土和重黏土在水平方向的平均长度分别为 400 m、500 m、400 m、350 m、350 m 和 500 m。从质地层次的平均长度可以看出, 在垂直方向, 重砂土层和轻砂土层的厚度较大, 其次是重黏土层; 在水平方向, 轻砂土和重黏土的长度较大, 其次是重砂土和粉土。

2.1.3 空间毗邻相互转换趋势 转移强度可以用来描述不同变量间的转换趋势。通过比较实测转移强度 $r_{jk,\phi}$ 与体现统计独立空间毗邻转移趋势的转移强度 $\hat{r}_{jk,\phi}$, 可从非对角线转移强度率矩阵中看出变量之间的空间毗邻相互转换趋势(如, 某质地层次周边其他质地层次发生的趋势)。

此处, 将最大无关转移强度 $\hat{r}_{jk,\phi}$ 作为参考状态, 其与转移强度 $r_{jk,\phi}$ 的关系为:

$$r_{jk,\phi} = \alpha_{jk,\phi}(\hat{r}_{jk,\phi}) \qquad k \neq j \qquad (11)$$

式中, $\alpha_{jk,\phi}$(正值)为体现变量间空间毗邻转移趋势的系数。如果 $\alpha_{jk,\phi}$ 大于 1, 则说明变量 j 和 k 在 ϕ 方向具有一定的毗邻转移趋势。反之, 如果 $\alpha_{jk,\phi}$ 小于 1, 说明变量之间不存在这种转移趋势。

$$\hat{r}_{jk,\phi} = \frac{p_k}{\overline{L}_{k,\phi}(1-p_j)} \qquad (12)$$

因此, 根据前面得到的平均长度 $\overline{L}_{k,\phi}$ 和分布比例 p_k, 可以通过式(12)来获得 $\hat{r}_{jk,\phi}$。

将式(12)代入式(11), 便可获得体现毗邻转移趋势的转移强度矩阵。式(13)和式(14)分别是由曲周土壤剖面数据计算得到的垂直方向和水平方向的转移强度矩阵。式(13)和式(14)中体现转移趋势的系数便是式(11)中的 $\alpha_{jk,\phi}$。其中, 垂直方向转移强矩阵(13)的每一列的最大值分别为 2.20、2.07、2.15、1.38、1.57 和 1.50, 说明重砂土下面主要是重黏土, 轻砂土下面主要是粉土, 粉土下面主要是轻砂土, 壤土下面主要是轻砂土, 轻黏土下面主要是重黏

土, 重黏土下面主要是重砂土。而转移强度矩阵中重砂土向轻砂土、粉土向重黏土、重黏土向壤土的转移系数分别为 0. 14、0. 25、0. 80, 则说明重砂土和重黏土与其他土壤质地类型相邻的概率非常小。由于研究区域中粉土、壤土和轻黏土所占的比例较少, 土壤质地层次在垂直方向主要以重砂土 —重黏土 —重砂土的方式排列。这与 Li 等[17, 18]的研究结果是一致的。

$$R_z = \begin{array}{c} \\ hs \\ ls \\ silt \\ loam \\ lc \\ hc \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} hs & ls & silt & loam & lc & hc \end{array} \\ \begin{Bmatrix} -\frac{1}{\bar{L}=48.5} & 0.97\hat{r}_{12,z} & 0.87\hat{r}_{13,z} & 1.05\hat{r}_{14,z} & 0.99\hat{r}_{15,z} & 1.50\hat{r}_{16,z} \\ 0.14\hat{r}_{21,z} & -\frac{1}{\bar{L}=50.9} & 2.15\hat{r}_{23,z} & 1.38\hat{r}_{24,z} & 0.85\hat{r}_{25,z} & 1.15\hat{r}_{26,z} \\ 0.67\hat{r}_{31,z} & 2.07\hat{r}_{32,z} & -\frac{1}{\bar{L}=26.4} & 0.40\hat{r}_{34,z} & 0.00\hat{r}_{35,z} & 0.82\hat{r}_{36,z} \\ 0.84\hat{r}_{41,z} & 1.44\hat{r}_{42,z} & 1.20\hat{r}_{43,z} & -\frac{1}{\bar{L}=22.4} & 0.47\hat{r}_{45,z} & 0.80\hat{r}_{46,z} \\ 0.25\hat{r}_{51,z} & 1.13\hat{r}_{52,z} & 1.85\hat{r}_{53,z} & 1.03\hat{r}_{54,z} & -\frac{1}{\bar{L}=27.7} & 1.19\hat{r}_{56,z} \\ 2.20\hat{r}_{61,z} & 0.55\hat{r}_{62,z} & 0.25\hat{r}_{63,z} & 0.90\hat{r}_{64,z} & 1.57\hat{r}_{65,z} & -\frac{1}{\bar{L}=30.9} \end{Bmatrix} \end{array} \tag{13}$$

$$R_l = \begin{array}{c} \\ hs \\ ls \\ silt \\ loam \\ lc \\ hc \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} hs & ls & silt & loam & lc & hc \end{array} \\ \begin{Bmatrix} -\frac{1}{\bar{L}=400} & 0.59\hat{r}_{12,l} & 1.13\hat{r}_{13,l} & 2.27\hat{r}_{14,l} & 0.00\hat{r}_{15,l} & 1.05\hat{r}_{16,l} \\ 1.43\hat{r}_{21,l} & -\frac{1}{\bar{L}=500} & 0.98\hat{r}_{23,l} & 0.00\hat{r}_{24,l} & 1.36\hat{r}_{25,l} & 0.45\hat{r}_{26,l} \\ 0.23\hat{r}_{31,l} & 1.11\hat{r}_{32,l} & -\frac{1}{\bar{L}=400} & 1.42\hat{r}_{34,l} & 0.00\hat{r}_{35,l} & 2.46\hat{r}_{36,l} \\ 1.28\hat{r}_{41,l} & 0.59\hat{r}_{42,l} & 1.08\hat{r}_{43,l} & -\frac{1}{\bar{L}=350} & 1.69\hat{r}_{45,l} & 0.86\hat{r}_{46,l} \\ 0.49\hat{r}_{51,l} & 0.59\hat{r}_{52,l} & 1.29\hat{r}_{53,l} & 2.76\hat{r}_{54,l} & -\frac{1}{\bar{L}=350} & 1.84\hat{r}_{56,l} \\ 0.62\hat{r}_{61,l} & 2.08\hat{r}_{62,l} & 0.67\hat{r}_{63,l} & 0.00\hat{r}_{64,l} & 2.83\hat{r}_{65,l} & -\frac{1}{\bar{L}=500} \end{Bmatrix} \end{array} \tag{14}$$

同样, 水平方向转移强度矩阵(14) 中每一列的最大值分别为 1. 43、2. 08、1. 29、2. 76、2. 83 和 2. 46, 说明在水平方向与重砂土相邻的主要是轻砂土, 与轻砂土相邻的主要是重黏土, 与粉土相邻的主要是轻黏土, 与壤土相邻的主要是轻黏土, 与轻黏土相邻的主要是重黏土, 与重黏土相邻的主要是粉土。而轻黏土向重砂土和粉土、壤土向轻砂土和重黏土的转移率均为 0, 说明这几种土壤质地层次相邻的概率非常小。

另外, 矩阵(13) 中粉土向轻黏土和轻黏土向粉土的转移概率分别为 1. 85 和 0, 矩阵(14) 中重砂土向轻砂土和轻砂土向重砂土的转移率分别为 1. 43 和 0. 59, 说明土壤质地层次在垂直和水平方向均具有不对称的分布特点。

2 2　区域土壤剖面质地层次空间分布的三维随机模拟

根据 Switzer[19] 的理论和 Politis[20] 给出的多维马尔可夫链的定义, 假定任意方向某变量的空间变异特性均可由对应的一条马尔可夫链来模拟, 那么就可以将马尔可夫链模型扩展到二维或三维。

对于无穷多个方向来说, 即使某给定变量的分布比例恒定, 那么不同方向的马尔可夫链模型也是不同的, 所以用常规的数据构建任意方向的一维马尔可夫链模型是远远不够的。但是可以先通过构建三个主要方向(x, y, z) 的一维马尔可夫链模型, 然后利用式(15) 进行三维插值就可以得到任意方向的一维连续马尔可夫链模型。所以, 最终的三维马尔可夫链模型考虑到了变量在不同方向的空间变化规律。

$$|r_{jk,\phi}| = \sqrt{\left(\frac{h_x}{h_\phi} r_{jk,x}\right)^2 + \left(\frac{h_y}{h_\phi} r_{jk,y}\right)^2 + \left(\frac{h_z}{h_\phi} r_{jk,z}\right)^2} \quad \forall j,\ k \neq \beta \tag{15}$$

其中: $|h_\phi| = \sqrt{h_x^2 + h_y^2 + h_z^2}$; $r_{ij,x}$, $r_{ij,y}$, $r_{ij,z}$ 分别为主方向 x, y, z 上的转移强度; β 表示建模过程中用来作为背景色的质地类型[10]。

下面分别介绍垂直和水平方向的一维马尔可夫链模型的构建。

2.2.1 垂直和水平方向的马尔可夫链模型 由于垂直方向质地层次的观察精确到 1 cm, 所以数据较为丰富。在这里可以用离散型马尔可夫链来构建垂直方向的马尔可夫链模型。在垂直方向选取步长为 5 cm, 得到实测离散转移概率(表 1)。根据本文 1.2.2 中离散型马尔可夫链与连续型马尔可夫链的关系, 将实测离散转移概率代入式(5) 便可得到连续的转移强度(如图 1 中实线所示)。

与垂直方向不同, 由于水平方向取样间隔远大于垂直方向, 其数据量相对于垂直方向而言较为稀缺, 所以用嵌入型马尔可夫链来构建水平方向的马尔可夫链模型。模型中的毗邻转移趋势是通过嵌入型马尔可夫链与连续型马尔可夫链的关系得到的。质地层次的平均长度是由转移概率估算的。由式(7) 可知, 对于非对角线上的元素, 嵌入型马尔可夫链的转移概率和连续型马尔可夫链的转移强度之间可相互转换, 因此, 可将由原始剖面数据得到的嵌入转移概率矩阵式转换成连续型的转移强度矩阵。转移强度矩阵中对角线上的元素可通过式(10) 得到。图 2 中的连续型马尔可夫链模型(实线) 便是通过转移强度得到的。由于水平 x 和 y 方向的转移概率矩阵非常相似, 为了简化, 假定水平主方向 x 和 y 具有相同的马尔可夫链模型。

表 1 垂直方向实测转移概率

Table 1 Measured horizontal transition probability of soil texture layers

空间步长 Lag(m)	t_{11}	t_{12}	t_{13}	t_{14}	t_{ij}	t_{62}	t_{63}	t_{64}	t_{65}	t_{66}
0.0	1.000	0.000	0.000	0.000	…	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
0.05	0.709	0.079	0.027	0.045	…	0.168	0.099	0.042	0.017	0.625
0.10	0.635	0.102	0.037	0.053	…	0.202	0.133	0.060	0.019	0.516
0.15	0.576	0.127	0.046	0.056	…	0.216	0.163	0.076	0.021	0.441
0.20	0.519	0.149	0.058	0.063	…	0.226	0.189	0.092	0.018	0.383
0.25	0.466	0.175	0.065	0.070	…	0.232	0.214	0.106	0.013	0.340
⋮										

2.2.2 三维马尔可夫链模型 在获得三个主要方向的马尔可夫链模型后, 再通过式(15) 进行三维插值便可获得完整的三维马尔可夫链模型。

2.2.3 区域土壤剖面质地层次的条件模拟 将上述模型用于顺序指示模拟, 再通过模拟退火(零度灭火) 算法, 便可生成曲周县北部质地层次空间分布的地统计学实现(图 3)。这个实现的约束条件是由土壤剖面数据计算得到的质地层次间的转移概率。关于顺序指示模拟及模拟退火的具体内容可参阅文献[21] 和(2)。

从曲周研究区条件模拟的地统计学实现可以看出(图 3), 模拟结果基本反映了冲积土的特性, 并保留了模型中的交叉协相关关系, 体现了不同质地层次间的毗邻转移趋势。如前所述, 模型中的参数基本反映了研究区域质地层次在垂直和水平方向的分布特点。如研究区域质地主要是以重砂土、轻砂土和重黏土为主。质地层次在垂直方向主要是以重砂土—重黏土—重砂土的顺序排列, 即重砂土下面主要以重黏土为主, 重黏土下面主要以重砂土为主; 水平方向, 与重砂土相邻的主要是轻砂土、重黏土和壤土, 而与重黏土相邻的主要是粉土和轻黏土。此外, 模拟结果也保留了质地层次的空间分布特征。如在研究区域的土体表层质地主要以轻砂土为主, 重黏土主要分布在研究区中部、最西侧和最东侧的洼地区域, 且西部的重黏土层较东部的重黏土层厚。在中西部的漳河故道区域的表层主要以重砂土为主, 这些均与实际观测结果相符。

(2) Carle S F. A transition probability-based approach to geostatistical characterization of hydrostratigraphic architecture. Ph. D. dissertation. Davis: University of Calif., 1996

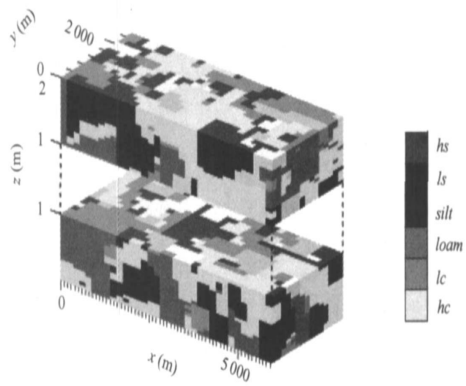


图 3　由基于三维马尔可夫模型的条件顺序指示模拟和模拟退火生成的曲周冲积平原的一部分地统计实现

Fig. 3　Geostatistical realization of a portion of Quzhou fluviogentic plain using conditional sequential indicator simulation and simulated quenching based on the three-demensional Markov chain model

3　结　论

本文根据华北冲积平原上一块面积约 15 km^2区域内的 139 个土壤剖面观测数据, 运用基于转移概率的地统计学模型分析了该区主要方向(垂直和水平) 土壤质地层次空间分布的变异特性。结果表明, 土壤质地层次的空间分布不是纯随机的, 而是具有一定的空间毗邻转移趋势。该模型中的三个参数: 分布比例、平均长度和毗邻转移趋势可以较直观地描述土壤剖面质地层次的空间分布特征。

无论数据丰富或稀缺, 与传统的基于变异函数的地统计学模型相比, 马尔可夫链模型可以很好地描述土体构型的空间不对称性, 该模型中所用到的三个参数比较直观地反映出土壤质地层次的空间分布和变异特征, 不仅易于理解, 而且避免了传统变异函数繁琐的建模过程。

通过将转移概率地统计学与条件模拟相结合, 得到了土壤质地层次空间分布的三维地统计学实现。模拟结果不仅很好地保留了土壤剖面实际观测数据中土壤质地层次的分布特征, 而且体现了不同质地层次间的毗邻转移趋势。本研究得到的模型及模拟结果可以为土地利用及土壤水分和污染物在土壤中的运移研究提供更为合理准确的基础资料。

致　谢　　感谢美国加利福利亚大学 Carle 博士提供了模型软件; 南京大学吴吉春教授提供了相关资料。

参 考 文 献

[1]　Kite G W, Kauwen N. Water modeling using land classification. Water Resour. Res., 1992, 28: 3 193~ 3 200

[2]　Zhu A X, Mackay D S. Effects of spatial detail of soil information on watershed modeling. J. Hydrol., 2001, 248: 54~ 77

[3]　李韵珠, 胡克林. 蒸发条件下黏土层对土壤水和溶质运移影响的模拟. 土壤学报, 2004, 41(4): 493~ 502. Li Y Z, Hu K L. Simulation for the effect of clay layer on the transport of soil water and solutes under evaporation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 493~ 502

[4]　Li W D, Li B G, Shi Y C. Markov chain simulation of soil textural layers. Geoderma, 1999, 92(12): 37~ 53

[5]　郭笃发. 利用马尔可夫过程预测黄河三角洲新生湿地土地利用/覆被格局的变化. 土壤, 2006, 38(1): 42~ 47. Guo D F. Pridiction of land use and land cover patterns in recent Yellow River delta using Markov chain model (In Chinese). Soils, 2006, 38(1): 42~ 47

[6]　Wang S Q, Yu G R, Zhao Q J, *et al*. Spatial characteristics of soil organic carbon storage in China's croplands. Pedosphere, 2005, 15(4): 417~ 423

[7]　Carle S F, Fogg G E. Transition probability-based indicator geostatistics. Math. Geol., 1996, 28(4): 453~ 476

[8]　Carle S F, Fogg G E. Modeling spatial variability with one- and multi-dimensional continuous Markov chain. Math. Geol., 1997, 29(7): 891~ 918

[9]　Weigand H, Totsche K U, Huwe B, *et al*. PAH mobility in contaminated industrial: A Markov chain approach to the spatial variability of soil properties and PAH levels. Geoderma, 2001, 102: 371~ 389

[10]　Weissmann G S, Fogg G E. Multi-scale alluvial fan heterogeneity modeled with transition probability geostatistics in a sequence stratigraphic framework. J. Hydrol., 1999, 226: 48~ 65

[11]　李保国, 李卫东, 石元春. 冲积平原区上区域土壤质地层次的某些分布特征. 土壤学报, 1998, 35(4): 433~ 440. Li B G, Li W D, Shi Y C. Some distribution features of textural layers of regional soils in a fluviogenic plain (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(4): 433~ 440

[12]　李卫东, 李保国, 石元春. 应用 Markov 链理论描述区域冲积土壤质地层次的垂向变化特征. 土壤学报, 1999, 36(1):

15~ 24. Li W D, Li B G, Shi Y C. Using Markov chain theory to quantitatively describe the chances of textural layers in an alluvial region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(1): 15~ 24

[13] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000. 75~ 76. Huang C Y. Soil science (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000. 75~ 76

[14] 何芳, 吴吉春. 基于马尔可夫链的多元指示地质统计模型. 水文地质工程地质, 2003, 5: 28~ 32. He F, Wu J C. Markov chain-based multi-indicator geostatistical model (In Chinese). Hydrogeology and Engineering Geology, 2003, 5: 28~ 32

[15] Weissmann G S, Carle S F, Fogg G E. Three-dimensional hydrofacies modeling based on soil surveys and transition probability geostatistics. Water Resour. Res., 1999, 35(6): 1 761~ 1 770

[16] Li W D. Transiogram: A spatial relationship measure for categorical data. International Journal of Geographical Information Science, 2006, 20 (6): 693~ 699

[17] Li W D, Li B G, Shi Y C, *et al*. Application of the Markov chain theory to describe spatial distribution of soil textural layers. Soil Sci., 1997, 162: 672~ 683

[18] Li W D, Li B G., Jacques D, *et al*. Effect of spatial variation of textural layers on regional field-water balance. Water Resour. Res., 2001, 37(5): 1 209~ 1 220

[19] Switzer P. A random set process with a Markovian property. Ann. Math. Stat., 1965, 36(2): 1 859~ 1 863

[20] Politis D N. Markov chains in many dimensions. Adv. Appl. Prob., 1994, 26(3): 756~ 774

[21] Carle S F. Implementation schemes for avoiding artifact discontinuities in simulated annealing. Math. Geol., 1997, 29(2): 231~ 244

STOCHASTIC SIMULATION OF THREE-DIMENSIONAL SPATIAL DISTRIBUTION OF SOIL PROFILE TEXTURAL LAYERS IN ALLUVIAL PLAIN, NORTH CHINA

He Yong[1] Hu Kelin[1] Li Weidong[2] Li Baoguo[1†]

(1 *Department of Soil and Water Sciences, China Agricultural University, Beijing* 100094, *China*)

(2 *Department of Geography, Kent State University, Kent, OH* 44242, *USA*)

Abstract Complicated variability of the spatial distribution of soil textural layers is a typical characteristic of alluvial soil. Quantificational description of soil profile structure is crucial to the study of land use and transport of soil water and solute. Based on observation of 139 soil profiles in a 15 km^2 region in alluvial plain, North China, a transition probability geostatistical model was used to analyze variability of the spatial distribution of soil textural layers. Results indicate that the distribution of soil textural layers is not merely stochastic, but shows a certain tendency of juxtapositional transference. When this model was used in the conditional simulation of indicator kriging method, the final three-dimensional geostatistical realization of soil textural layers spatial distribution reflected the cross correlation between different soil textural layers. The findings may serve as powerful support for further simulation of water movement and solute transport in the regional soil.

Key words Soil textural layers; Transition probability; 3-D Markov chain; Spatial distribution; Stochastic simulation