

应用 Markov 链理论定量描述区域冲积土壤质地层次的垂向变化特征*

李卫东

(中国科学院地理研究所, 北京 100101)

李保国 石元春

(中国农业大学土壤和水科学系)

摘要 冲积土壤剖面质地层次的垂向变化是一个十分复杂的问题, 长期以来都是定性描述而无法量化。但土壤剖面的质地层次组合特点对土壤水分转化和溶质运移等具有重要影响, 对其定量地描述和研究是进一步准确定量区域农田水转化和溶质运移的基础。马尔可夫链理论是用来描述随时间(空间)变化的一个离散状态序列的状态转移特性的, 本文将其引入来研究冲积土壤剖面质地层次的垂向变化规律。研究结果表明, 区域冲积土壤剖面质地层次的垂向变化具有明显的马氏性, 其转移概率矩阵(TPM)具有近似的平稳的特点; 研究区内土壤质地层次以粘土层为主, 其次依次为沙土层、沙壤层、中壤层、轻壤层和重壤层, 组合方式以粘-沙、沙-粘, 粘-沙-粘和沙-粘-沙为主。

关键词 冲积土壤, 质地层次, 马氏链, 转移概率矩阵

中图分类号 S152.3

冲积土壤剖面的质地层次组合是一个十分复杂的问题, 在很小的区域内较为一致, 在较大的区域内则表现出随机性。长期以来, 人们在研究冲积土壤剖面质地层次组合特点时, 都是采用对一些典型剖面定性描述的方式, 而无法量化, 更谈不上模拟和预测, 也无法与其它相关的研究有效地结合^[1-3]。马尔可夫(Markov)链理论是用来描述随时间(空间)变化的一个离散状态序列的状态转移特性的, 本研究将其引入来试图定量描述和研究区域冲积土壤质地层次的垂向变化规律, 相信这有助于对土壤过程的定量化研究, 并对区域水盐运动的研究有参考意义。

马尔可夫过程理论是随机过程理论中的一种, 它是本世纪初由苏联学者 Markov 最先提出的。自 60 年代以来, 马尔可夫过程理论得以迅速发展和逐步完善。马尔可夫过程是这样一种过程: 过程在下一个时刻(或空间位置)将达到的状态, 仅依赖于目前所处的状态, 而与以往处过的状态无关。因此它是一种弱相关的随机过程。马尔可夫链是马尔可夫过程的一种形式, 它可看作是随时间变化的一个离散的状态序列(或链), 其中由一个状态转移到另一个状态的概率取决于前面相邻发生的状态。马尔可夫链的特征可由转移概率矩阵 TPM(Transition probability matrix)来描述^[4]。马尔可夫链理论已在描述和预测地层演替、植被演替、土地利用变化以及水资源系统分析和降雨序列模拟等方面得到广泛应

* 国家自然科学基金重大项目(批准号49391601)部分工作

收稿日期: 1996-12-20; 收到修改稿日期: 1997-10-07

用,并在某些应用中取得较满意的结果^[5-12]。本文将冲积土壤质地层次的垂向变化视为马尔可夫链,依据一定区域内大量土壤剖面的质地层次资料建立了 TPM,通过 TPM 探讨了区域冲积土壤质地层次垂向变化的马氏性、平稳性和层次组合特点、互相影响、在拥有上下层上的相似性等。

1 原理和方法

通常所说的土壤剖面是指垂向一维的。对于冲积土壤,它表现为一系列不等厚度质地层次的组合。在一定的区域内,它的相邻层次间常表现出一定的相关性,即某种质地层次之下,较多地出现另一种或几种质地层次,而较少地出现其余种类的质地层次。由此,可以将土壤质地层次剖面看作是一个马尔可夫链。那么,区域内每一个具体的土壤剖面便是该马尔可夫链的一次实现或一个样本,格网化(或纯随机)分布的大量剖面便可看作该马氏链的多次实现或多个样本。对这大量样本进行统计,计算出马尔可夫 TPM,便可定量地描述该马氏链的特性。土壤剖面显然是连续空间离散状态的马氏链。对于连续时间(空间)离散状态的马氏链,在具体研究中既可按等时间(空间)间隔状态变化,也可以按不同性质状态变化来计算 TPM。对于前者,同一性质状态的持续时间便有指数分布的特点,这是马氏链的固有特性,这用于对某些具体问题研究并不适宜。对于后者,同一性质状态的持续时间(在此为质地层次厚度)在 TPM 中不包含,可依具体情况采用适当的分布函数,将这些分布函数和 TPM 联合起来,来描述该马氏链,此即作为一种嵌入马氏链方法^[4]。本研究仅借助于 TPM 本身来探讨区域冲积土壤剖面的质地层次变化特点。

依据马尔可夫过程的可逆性^[4],本研究在描述土壤剖面时,将采用逆向方式(即自上而下,与沉积顺序相反),以适应人们观察土壤剖面的习惯和以后模拟土壤剖面的方便。

1.1 质地层次转移概率矩阵(TPM)的构建

在冲积土壤上选择一定面积的区域范围作为研究区。在研究区内按格网化或纯随机方式(否则缺乏代表性)布设一定密度的观测剖面点。按研究区内的土壤层次质地状况和研究需要划分质地层次类型,如,可划分出沙土层(1)、沙壤层(2)、……、粘土层(m)等不同的质地层次类型。对各观测剖面(确定深度,如 2 米)自上而下依质地类型变化分层,记录各层的顺序、质地和厚度。也可按等厚度(如 5cm)分层,记录各层的顺序和质地类型,若某一确定厚度的层次包含两个质地类型不同的层次,则以较厚层次的质地类型为准。将所有剖面的层次自上而下的变化记录统计,把相同的层次变化(转移)类型归总,如,把沙土层(1)向沙壤层(2)的变化归总为 n_{12} 。可按如下方式建立层次转移的频数矩阵:

$$N = \begin{array}{c} \text{上} \\ \text{层} \\ \vdots \\ (i) \end{array} \begin{array}{c} \text{下 层} \\ \text{层次类型} \end{array} \begin{array}{c} (j) \\ 1 \quad 2 \quad \cdots \quad m \end{array} \begin{array}{c} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_m \end{array} \begin{array}{c} \left[\begin{array}{cccc} n_{11} & n_{12} & \cdots & n_{1m} \\ n_{21} & n_{22} & \cdots & n_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ n_{m1} & n_{m2} & \cdots & n_{mm} \end{array} \right] \\ n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_m \end{array} \quad (1)$$

这里 m 为层次的质地类型数, n_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, m$) 为第 i 种质地层次向第 j 种质地层次转移的总频数,

n_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 为第 i 种质地层次向其它种质地层次的转出总频数,即 $\sum_{j=1}^m n_{ij}$ 。若层次仅按质地类型划

分,则对角线元素 $n_{ii} = 0$,若层次按等厚度划分,则 n_{ii} 一般不为零,即存在同种质地类型层次的自转。

将转移频数矩阵中的每一行数据(元素)都除以该行元素的总和 n_i ,即可得质地层次垂向(自上而下)转移的概率矩阵(TPM)如下:

$$P = [P_{ij}] = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{下 层} & (j) \\ \text{层次类型} & 1 & 2 & \cdots & m \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{上} \\ \text{层} \\ \vdots \\ (i) \end{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ m \end{matrix} & \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

这里 P_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, m$) 为该研究区内第 i 种质地层次向第 j 种质地层次转移的概率(即第 i 种质地层次之下出现第 j 种质地层次的概率)。同样,若层次仅按质地类型划分,则对角线元素 $p_{ii} = 0$,若层次按等厚度划分,则 p_{ii} 一般不为零,且在确定的层次厚度较小时, p_{ii} 一般较大。

将 P 多次乘幂,便可逐步达到稳定状态,即各行之间同列元素相等,可得极限矩阵 LM(Limit matrix) 为 $T = (a_1, a_2, \dots, a_m)$, 这里 a_1, a_2, \dots, a_m 为 P 达稳定态时的一行元素。

1.2 马氏性检验

马氏性检验就是要检验逐次发生的事件(或状态)之间是独立的,还是不独立的。本研究中要检验的即是剖面中逐次出现的层次间是否是独立的。若是不独立的,它们可以构成一个一阶马尔可夫链。Anderson 和 Goodman^[13]提出的检验统计量为

$$\lambda = \prod_{i,j} \left(\frac{p_{ij}}{p_{ij}'} \right)^{n_{ij}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

其中 $-2\ln\lambda$ 的分布渐近于自由度为 $m(m-1)$ 的 χ^2 分布,表达式为

$$-2\ln\lambda = 2 \sum_{i,j} n_{ij} \ln \left(\frac{p_{ij}}{p_{ij}'} \right) \quad (4)$$

其中, p_{ij} 为 TPM 的第 (i, j) 个元素; p_{ij}' 为第 j 列的边缘概率 ($= \sum_i n_{ij} / \sum_{i,j} n_{ij}$); n_{ij} 为转移频数矩阵中第 (i, j) 个元素; m 为状态(即质地层次类型)的总数。

1.3 平稳性检验

在一个平稳的马尔可夫链内, p_{ij} 是从时间(或空间) $t-1$ 处状态 i 转移到时间(或空间) t 处状态 j 的概率。而在非平稳的马尔可夫链内转移概率是随时间(或空间)变化的,因此 $p_{ij}^{(t)}$ 是由状态 i 转移到状态 j 的概率,且是时间(或空间)的函数。要检验的零假设是,对于 $t = 1, 2, \dots, T$, 有 $p_{ij}^{(t)} = p_{ij}$ 。也就是说,要观察由每一个子区间计算出的随时间(空间)变化的转移概率是否等于由整个区间估计(或计算)得到的 TPM 中相应的元素。备择假设是非平稳的马尔可夫链,即: $p_{ij}^{(t)} \neq p_{ij}$ 。Anderson 和 Goodman 提出的检验统计量如下^[13]:

$$\lambda = \prod_t \prod_{i,j} \left[\frac{p_{ij}}{p_{ij}^{(t)}} \right]^{n_{ij}^{(t)}} \quad (5)$$

当平稳的零假设为真时, $-2\ln\lambda$ 是自由度为 $(T-1)[m(m-1)]$ 的 χ^2 分布。在此, m 为状态数; T 为时间(或空间)的子区间数; $n_{ij}^{(t)}$ 为在 t 个空间子区间内从状态 i 转移到状态 j 的总频数。上面的方程式

可变换为:

$$-2\ln\lambda = 2 \sum_i^r \sum_j^m n_{ij}^{(0)} \ln \left[\frac{p_{ij}^{(0)}}{p_{ij}} \right] \quad (6)$$

1.4 质地层次转移的熵组

质地层次之间的影响和依赖性还可以从转移的熵组值上看出^[4]。将研究区不同类型质地层次向下的转移频数矩阵反转,并求概率矩阵,即可得向上的 TPM $Q = [Q_{ij}]$,对 Q 可以定义如下的熵组

$$H_i(\text{up}) = - \sum_{j=1}^m q_{ij} \log_2 q_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

这里 q_{ij} 为 Q 的第 (i, j) 个元素,即第 i 种质地层次之上出现第 j 种质地层次的概率。在此规定“ $0 \cdot \infty = 0$ ”。 $H_i(\text{up}) = 0$,表示 i 层确定性地控制了它的上层质地类型。若 $H_i(\text{up})$ 较小,这可解释为层次类型 i 具有较强的记忆力,而且这种记忆力是随着 $H_i(\text{up})$ 的减小而增强的。若 $H_i(\text{up})$ 较大,这表明层次类型 i 的记忆力较弱,模糊不清,因而有较多类型的质地层次可以作为 i 类型质地层次的上部层次(即后继状态)。

类似地,对向下的 TPM $P = [P_{ij}]$ 可定义向下转移的熵组

$$H_i(\text{down}) = - \sum_{j=1}^m p_{ij} \log_2 p_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

$H_i(\text{down})$ 反映的情况与 $H_i(\text{up})$ 对称,即 $H_i(\text{down})$ 越小,表明 i 类型质地层次对下层质地类型的依赖性越强。

综合考察 $H_i(\text{up})$ 和 $H_i(\text{down})$,若 $H_i(\text{up}) > H_i(\text{down})$,即表明 i 类型质地层次的上层质地类型比下层质地类型在出现上有更大的不确定性。反之亦然。

1.5 质地层次转移的相似性度量

对研究区不同类型质地层次转移的 TPM 各行之间,可以统计出如下的相似性度量^[4]。对于向上的 TPM $Q = [Q_{ij}]$ 有

$$U_{ij} = \left(\sum_{k=1}^m q_{ik} q_{jk} \right) / \sqrt{\sum_{k=1}^m q_{ik}^2 \sum_{k=1}^m q_{jk}^2} \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

U_{ij} 反映了质地层次 i 与 j 之间在具有同一类型上层的倾向上的相似程度。记 $U = [U_{ij}]$,显然有 $U_i = 1, 0 \leq U_{ij} \leq 1, U_{ij} = U_{ji}$ 。 U_{ij} 的数值越高表明在剖面层次中质地层次 i 与 j 将以较大的概率有相同类型上层。对称地,对于向下的 TPM $P = [P_{ij}]$,可得 $D = [D_{ij}]$, D_{ij} 的意义与 U_{ij} 对称。再定义 $C_{ij} = U_{ij} \cdot D_{ij}$,可得 $C = [C_{ij}]$, C_{ij} 的数值描述了质地层次类型 i 与 j 在拥有上下层类型上的相似程度。 C_{ij} 值越大,表明 i 与 j 越有可能有相同类型的上下层次。

2 结果和讨论

2.1 研究区概况和试验设计

研究区设在河北省曲周县农大试验站一带,北纬 $36^\circ 51'$,东经 $115^\circ 3'$ 。为一总面积约 15 平方公里东西较长的矩形区。支漳河大致从中间自南向北穿过。研究区大部分面积为漳河冲积扇河间壤质低地。自西向东可依次划分为河间洼地、漳河故道、决口扇形地、河间洼地、河间微倾平原、河间洼地。整个地势较为平坦,海拔 34.5—35.0m。土壤类型主要为潮湿锥形土,中间尚有少许斑点状分布的盐成土。

观测剖面点布置采用平行四边形格网化布点(图 1), 四边形边长 360m。共设 142 点, 因村庄影响实测 139 点。开挖剖面与钻孔面相结合, 观测深度 2m。对每一剖面记录质地层次变化及厚度。质地类型划分为六级, 即沙土(1)、沙壤(2)、轻壤(3)、中壤(4)、重壤(5)和粘土(6)(大致按卡庆斯基制), 参考以前有关资料及部分实测资料主要以手摸法确定。质地层次厚度观测精度为 1cm, 为计算方便, 统计精度为 5cm(如小于 7.5cm, 视为 5cm, 7.5—12.5cm 视为 10cm, 依次上推)。

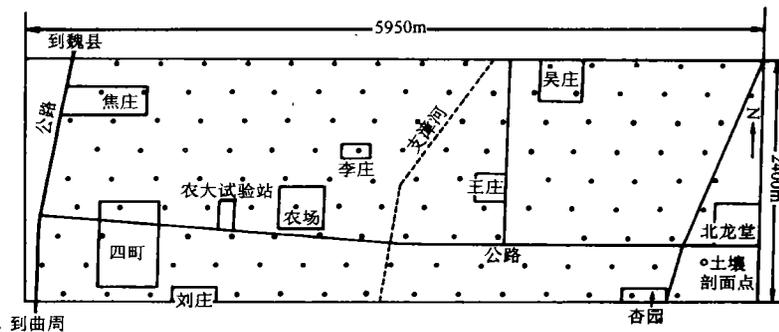


图1 研究区和观测剖面点示意图

Fig.1 The sketch chart of the study region and locations of observed profiles

2.2 TPM 的构建

对 139 个剖面按不同类型质地层次变化(不考虑厚度)统计出自上而下的转移频数矩阵见表 1。

表1 不同类型质地层次垂向变化的频数统计

Table 1 Statistical frequencies for the vertical changes of different types of textural layers

质地层次类型 Textural layer type	下 层 Lower layer						合 计 Total
	沙土层(1) Sand	沙壤层(2) Sand loam	轻壤层(3) Light loam	中壤层(4) Medium loam	重壤层(5) Clay loam	粘土层(6) Clay	
上							
沙土层(1)	0	2	11	20	1	65	99
沙壤层(2)	36	0	31	31	4	49	151
轻壤层(3)	15	13	0	12	3	29	72
中壤层(4)	22	10	3	0	2	49	86
重壤层(5)	3	1	0	1	0	6	11
粘土层(6)	89	24	20	27	7	0	167
合 计	165	50	65	91	17	198	586

将此矩阵的每一元素除以该行的总数, 即可得出不同类型质地层次垂向变化的 TPM 为

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0.02 & 0.11 & 0.20 & 0.01 & 0.66 \\ 0.24 & 0 & 0.21 & 0.21 & 0.03 & 0.32 \\ 0.21 & 0.18 & 0 & 0.17 & 0.04 & 0.40 \\ 0.26 & 0.12 & 0.03 & 0 & 0.02 & 0.57 \\ 0.27 & 0.09 & 0.00 & 0.09 & 0 & 0.55 \\ 0.53 & 0.14 & 0.12 & 0.16 & 0.04 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

如果将 2m 土壤剖面按 5cm 厚度划分为 40 层,对 139 个剖面统计层次之间的转移,则可得等厚度(5cm)质地层次垂向变化的 TPM 为

$$P_{5\text{cm}} = \begin{bmatrix} 0.936 & 0.002 & 0.006 & 0.014 & 0.001 & 0.040 \\ 0.022 & 0.904 & 0.020 & 0.021 & 0.004 & 0.029 \\ 0.040 & 0.031 & 0.828 & 0.028 & 0.012 & 0.061 \\ 0.061 & 0.022 & 0.007 & 0.788 & 0.004 & 0.118 \\ 0.040 & 0.010 & 0.010 & 0.020 & 0.840 & 0.080 \\ 0.076 & 0.017 & 0.017 & 0.025 & 0.006 & 0.859 \end{bmatrix} \quad (11)$$

将 TPM 进行多次乘幂后,便可达到稳定状态,从而得到极限矩阵 LM。这里,

$$T = (0.28 \quad 0.09 \quad 0.10 \quad 0.15 \quad 0.03 \quad 0.35) \quad (12)$$

$$T_{5\text{cm}} = (0.46 \quad 0.10 \quad 0.06 \quad 0.08 \quad 0.02 \quad 0.26) \quad (13)$$

2.3 质地层次垂向变化的马氏性

对研究区土壤不同类型质地层次的转移矩阵(表 1 和式 10)进行统计计算得 $\chi^2 = -2\ln\lambda = 356.22$ 。这里自由度 $n = 6(6 - 1) = 30$ 。如果取显著水平 $\alpha = 0.05$,则对应的 $\chi^2_{(30)0.95} = 43.8 \ll -2\ln\lambda = 356.22$ 。所以,研究区内土壤剖面不同类型质地层次的垂向变化具有明显的马氏性,即土壤剖面逐次出现的不同类型质地层次之间是不独立的。

2.4 质地层次垂向变化的马氏链平稳性

在前面构建研究区中土壤剖面质地层次垂向变化的 TPM 时,实质上是假定了马尔可夫 TPM 是空间平稳的过程产生的,即在垂向 2m 范围内,转移概率是固定不变的。如果将垂向 2m 范围再划分成若干子区间并分别计算出它们的 TPM,对于平稳的随机过程来说,这些矩阵彼此之间应是近似相等的。否则,则过程不平衡,总的 TPM 就反映不出过程的真正变化特点。

对研究区内土壤剖面质地层次的观察和统计表明,2m 深度内,质地层次数少则一两层,多则近十层。因此,同一 2m 剖面中同种质地层次重复出现的机会并不多。粘土层总数最多,也平均不到一个剖面两层,同一剖面内超过 3 层的很少。而在同一剖面内,同一种组合形式(如沙土层-粘土层组合)多次出现的机会就更少。因此,在考察土壤剖面质地层次垂向变化的平稳性时,将 2m 剖面分成 0—1m 和 1—2m 两个子区间已足够。如果质地层次转移正处在 100cm 处,则计入 1—2m 子区间内。据此,对研究区内全部观测点土壤剖面质地层次垂向变化的全区间(2m)和子区间 TPM 进行了统计,全区间结果见(10)式,子区间结果见表 2。可以看出,两子区间内的 TPM 间有一定的差异。依检验方案统计结果为 $\chi^2 = -2\ln\lambda = 48.82$,在此自由度为 $(2 - 1)[6(6 - 1)] = 30$ 。如果在此指定显著水平为 $\alpha = 0.01$,则对应的 $\chi^2_{(30)0.99} = 50.9$,大于 48.82。据此,可以勉强认为研究区内土壤剖面质地层次的垂向变化的马尔可夫链是近似平稳的。

2.5 研究区土壤剖面质地层次组合特点

从前面列出的全研究区土壤不同类型质地层次变化的转移矩阵(表 1 和式 10)可以看出,由于沙壤层主要分布于表层,因而转入量远小于转出量,沙土、粘土和沙壤层次数明显较多;在沙土层之下主要出现粘土层,概率达 0.66,其次是中壤层,概率为 0.20;沙壤层之下

表2 研究区土壤剖面质地层次垂向变化的剖面子区间TPM

Table 2 TPMs of profile subintervals for the vertical changes of textural layers in the study region

		0—1米						1—2米(包括1米处)					
		0—1m						1—2m(Including 1m place)					
TPM	0	0.17	0.11	0.17	0.00	0.56	0	0.00	0.10	0.20	0.01	0.69	
	0.25	0	0.25	0.21	0.01	0.29	0.22	0	0.11	0.17	0.07	0.43	
	0.16	0.22	0	0.22	0.02	0.38	0.36	0.07	0	0.11	0.07	0.39	
	0.20	0.07	0.07	0	0.00	0.67	0.31	0.17	0.02	0	0.04	0.46	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0	1.00	0.33	0.11	0.00	0.11	0	0.44	
	0.47	0.22	0.20	0.10	0.02	0	0.54	0.11	0.09	0.20	0.07	0	

出现粘土层、沙土层、轻壤层和中壤层的概率接近,以出现粘土层为多,概率为 0.32;轻壤层之下出现粘土层较多,概率为 0.40,其次为沙土层、沙壤层和中壤层,概率达 0.26;重壤层数量太少,其转移概率尚难以说明问题,但其下仍以粘土层为主,沙土层其次;粘土层之下明显地以出现沙土层为主,概率达 0.53。总之,在各类质地层次之下,粘土层和沙土层出现机率较高,重壤层出现的机率均很小,沙壤层只在表层分布较多。这表明了,研究区内土壤剖面质地层次主要以粘—沙、沙—粘、粘—沙—粘和沙—粘—沙层次组合形式出现。

全区土壤不同类型质地层次垂向变化的 TPMP(式 10)经过多次乘幂(约 12 次)后,可得 LMT(式 12)。T 为状态(质地层次)之间经过多步转移后达到的稳定状态,它实质上代表了总体(全部质地层次数)中不同状态之间的数量上的比例(不同类型质地层次数之比或不同类型质地层次所占面积之比)。但由于统计中的各个土壤剖面都是较短的链,链端因缺乏转入或转出而产生的影响较大,因而这里所得出的 LM 仅是除去表层后的不同类型质地层次数之比。可以把各个土壤剖面首尾相接连成一个链进行统计并算出 LMT = (0.23, 0.22, 0.11, 0.13, 0.02, 0.29),此即所有剖面中不同类型质地层次层次数之比(或所占面积之比),明显地,粘土层最多,其次为沙土层、沙壤层,再次为中壤层、轻壤层,最少为重壤层。

按 5cm 厚度划分层次下统计所得的全区的 TPMP_{5cm}(式 11),由于 5cm 相比质地层次厚度较薄,因而同种质地类型层次的自转特别多,对角线上元素 p_{ij} 均在 0.78 以上。 p_{ij} 的大小也可以反映不同类型质地层次的厚度差异,可以看出, $p_{11} > p_{22} > p_{66} > p_{55} > p_{33} > p_{44}$,即表明沙土层厚度 > 沙壤层 > 粘土层 > 重壤层 > 轻壤层 > 中壤层。这与各种质地类型层次厚度均值的单独统计结果相比是一致的。

对整个研究区沿支漳河分成东西二区,分别统计出各分区土壤剖面不同类型质地层次变化的马尔可夫 TPM 见表 3。可以看出,东西二区有较大的差异,反映在东区有较高比例的粘土层但厚度薄,西区粘土层少但较厚。东区沙土层之下出现粘土层的概率远高于西区,说明东区内沙土—粘土层次组合更普遍。东区粘土层之下出现沙土层的概率也高于西区,这表明东区内粘土—沙土层的组合也更普遍。重壤层因层次数太少,转移概率较难说明问题,但西区中重壤层之下仅出现粘土层的特点也可表明,所划出的重壤层,不过是其它类型层次向粘土层的过渡层罢了。两分区的不同类型质地层次的 TPM 不同,也反映了两分区沉积环上的差异。

表3 东西二区不同类型质地层次的TPM

Table 3 TPMs for the vertical changes of different types of textural layers in east and west areas

	东区 East area						西区 West area					
TPM	0	0.00	0.04	0.01	0.02	0.83	0	0.04	0.18	0.29	0.00	0.49
	0.14	0	0.18	0.28	0.03	0.37	0.33	0	0.23	0.13	0.03	0.28
	0.09	0.13	0	0.09	0.00	0.70	0.27	0.20	0	0.20	0.06	0.27
	0.21	0.13	0.05	0	0.00	0.62	0.29	0.10	0.02	0	0.04	0.51
	0.50	0.17	0.00	0.17	0	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0	1.00
	0.57	0.14	0.06	0.17	0.11	0	0.49	0.15	0.19	0.15	0.02	0
LM	(0.29	0.09	0.06	0.13	0.03	0.40)	(0.27	0.10	0.13	0.16	0.03	0.31)

2.6 相邻层次间的相互影响

熵组值的计算结果见表 4, 剖面质地层次间的影响大小可以从中看出。如 H_1 (down) 最小, H_1 (up) 也较小, 表明了沙土层对下层的依赖性最强 (事实上, 沙土层之下, 主要出现粘土层, 这也就是说, 该地区在沉积过程中, 常常是在沉积了一层粘土之后, 接着沉积一层沙土), 对上层的依赖也较强。 H_6 (up) 最大, H_6 (down) 也较大, 表明粘土层对上层的依赖和对下层的依赖均不太强烈。 H_3 (up) 最小, H_3 (down) 则较大, 表明轻壤层对上层影响强烈,

表4 质地层次TPM的熵组表

Table 4 Entropy groups of TPM for the textural layers

H_i (up)	质地层次类型 (i) Textural layer type	H_i (down)
1.77	1	1.40
1.78	2	2.10
1.67	3	2.07
1.99	4	1.62
2.06	5	1.62
2.08	6	1.87

而对下层的依赖性则较小。

2.7 质地层次转移的相似性

相似性度量计算结果见表 5。从 D 中可以看出, D_{16} 最小, 说明沙土层和粘土层在拥有

表5 研究区土壤质地层次转移的相似性度量

Table 5 Similarity degree of vertical changes of soil textural layers in the study region

质地层 次类型 Textural layer type	D						U						C					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	1	0.79	0.84	0.86	0.88	0.12	1	0.88	0.77	0.79	0.96	0.33	1	0.70	0.65	0.68	0.84	0.04
2		1	0.84	0.79	0.83	0.64		1	0.47	0.62	0.88	0.35		1	0.40	0.48	0.73	0.22
3			1	0.92	0.95	0.55			1	0.94	0.82	0.62			1	0.87	0.78	0.34
4				1	0.99	0.42				1	0.88	0.67				1	0.87	0.29
5					1	0.46					1	0.52					1	0.24
6						1						1						1

下层上不相似,它们有完全不同质地类型的下层(实质上是以较大的概率互为下层),而 D_{45} 、 D_{34} 均很大,表明轻壤层、中壤层和重壤层之下,均有较为一致的下层(实质上均以较大的概率出现粘土层)。从 U 中看,它与 D 相关不远。

从 C 中可以看出,沙土层与粘土层在拥有上下层次上相似性最差,粘土层与任何其它类型质地层次在拥有上下层次上相似性都不好。轻壤层与中壤层的相似性较好,具有较为一致的上下层。

参 考 文 献

1. 叶文华. 华北平原农田土体构型与作物生长关系的研究. 地理学报, 1985, 40(1): 37—49
2. 李进法, 王希恩, 高广瑞等. 河北平原不同土体构型水分分布和运行规律及灌水模式. 干旱地区农业研究, 1996, 14(1): 3—9
3. 李卫东, 李保国, 石元春. 农田空间变异性特征与土壤水转化模型的研究. 见: 石元春等主编. 节水农业应用基础研究进展. 北京: 中国农业出版社, 1995. 64—71
4. 施仁杰著. 马尔科夫链基础及其应用. 西安电子科技大学出版社, 1992
5. 阳含照, 潘愉德, 伍业钢. 长白山阔叶红松林马氏链模型. 生态学报, 1988, 8(3): 211—219
6. 陈建忠, 徐福余, 周世勇. Markov 过程在森林资源结构动态预测中的应用—以福建省南平地区的树种结构为例. 应用生态学报, 1994, 5(3): 232—236
7. 徐 岚, 赵 羿. 利用马尔可夫过程预测东陵区土地利用格局的变化. 应用生态学报, 1993, 4(3): 272—277
8. 姚汝祥, 廖松等. 水资源系统分析及应用. 北京: 清华大学出版社, 1987. 114—149
9. Chin E H. Modeling daily precipitation occurrence process with Markov Chain. Water Resour. Res., 1977, 13(6): 949—956
10. Harbaugh J W, Bonham-Carter G F. Computer Simulation in Geology. Wiley-Interscience, a Division of John Wiley & Sons, Inc., 1980. 55—97
11. Krumbein W C. Statistical models in sedimentology. Sedimentology, 1968, 10: 7—23
12. Potter P E, Blakely R F. Random processes and lithologic transitions. Journ. Geol., 1968, 76: 154—170
13. Anderson T W, Goodman L A. Statistical inference about Markov Chain. Ann. Math. Stat., 1957, 28: 89—110

USING MARKOV CHAIN THEORY TO QUANTITATIVELY DESCRIBE THE VERTICAL CHANGES OF TEXTURAL LAYERS IN AN ALLUVIAL SOIL REGION

Li Wei-dong

(Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Li Bao-guo Shi Yuan-chun

(Dept. of Soil & Water Sciences, China Agricultural University)

Summary

The vertical changes of textural layers along profiles in alluvial soils are a very complicated problem. The vertical changes can be described only qualitatively but have not been quantified for a long time past. The characteristics of combination of textural layers in soil profiles greatly influence water transport and solute movement in the soil, so the quantitative description is a foundation for more accurate quantification of water transport and solute movement in field soils.

Markov chain theory can be used to characterize the state transition of a dispersed state sequence changing with time (or space). This work used it to study regulations of vertical changes of textural layers along profiles in alluvial soils. The results showed that the vertical changes of textural layers along profiles had Markov characteristic in an alluvial soil region and that its transition probability matrix (TPM) was nearly stable. Meanwhile, the features of combination of soil profile textural layers in the study region were studied by TPMs, entropy group values and similarity measures. Among soil textural layers in the study region, clay layers were predominant, then came sand soil layers, sand loam layers, medium loam layers, light loam layers and heavy loam layers in proper order. The combination patterns of textural layers in soil profiles are mainly clay-sand, sand-clay, clay-sand-clay and sand-clay-sand.

Key words Soil textural layer, Vertical changes, Markov chain, Transition probability Matrix (TPM)