第 32 卷第 6 期 地 质 与 资 源 Vol. 32 No. 6
2023 年 12 月 GEOLOGY AND RESOURCES Dec. 2023
文章编号:1671-1947(2023)06-0789-10 中图分类号:P642.1 开放科学标志码(OSID):
DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2023.06.016 文献标志码:A

基于转移概率的河北省定兴县地表基质垂向分布特征分析

乔衍溢,霍润斌,鲁 敏,王 献,赵凯明,张盼望,刘 勇
中国地质调查局 廊坊自然资源综合调查中心,河北 廊坊 065000

摘 要: 地表基质层为地表自然资源的承载体和赋存体的空间实体. 查明地表基质平面分布、垂向组合及空间变异是地表基质调查的关键. 将转移概率统计方法应用到河北省定兴县 5 m 以浅地表基质层,通过极限概率分析、置换分析、熵分析和差值矩阵环流分析,总结出定兴县及各地貌类型的地表基质的垂向组合与横向变化特征,并构建地表基质结构序列. 研究表明,该地区长地表基质受多种复杂成因因素的影响,其类型剧烈变化,自下至上的砂土基质-壤质砂土基质-砂质壤土基质-壤土基质为区内典型代表组合,壤质砂土基质-黏质壤土基质为次级组合类型. 结果显示,转移概率方法能够较为准确地刻画地表基质的空间分布,能够从大量繁杂的编录中获取区域内地表基质垂向变化的宏观规律.

关键词: 转移概率矩阵;马尔可夫链;地表基质;垂向结构;环流分析;河北省

VERTICAL DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF GROUND SUBSTRATE BASED ON TRANSITION PROBABILITY MATRIX: A Case Study of Dingxing County, Hebei Province

QIAO Yan-yi, HUO Run-bin, LU Min, WANG Xian, ZHAO Kai-ming, ZHANG Pan-wang, LIU Yong
Langfang Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Langfang 065000, *Hebei Province, China*

Abstract: Ground substrate serves as the carrier of surface natural resources and spatial entity of occurrence body. Finding out the characteristics of plane distribution, vertical assemblage and spatial variation of ground substrate is the key to ground substrate survey. The transition probability statistical method is applied to the ground substrate in the depth of 0–5 m in Dingxing County of Hebei Province. The vertical combination and lateral variation characteristics of ground substrate in Dingxing County and various geomorphic types are summarized and the structure sequence of ground substrate is constructed through limit probability analysis, displacement analysis, entropy analysis and difference matrix circulation analysis. The study shows that the types of ground substrate in the area vary dramatically under the influence of many complex genetic factors. The typical combination is sand-loamy sand-sandy loam-loam ground substrate from bottom to top, and the secondary combination loamy sand-clay loam ground substrate. The results indicate that the transition probability method can accurately describe the spatial distribution of ground substrate, and obtain the macroscopic rule of vertical change of ground substrate in the region from large numbers of miscellaneous catalogues.

Key words: transition probability matrix; Markov chain; ground substrate; vertical structure; circulation analysis; Hebei Province

收稿日期:2022-11-24;**修回日期:**2022-12-15. **编辑:**张哲.
基金项目:中国地质调查局项目"河北省保定地区自然资源地表基质层试点调查"(ZD20220117).
作者简介:乔衍溢(1992—),男,硕士,工程师,主要从事地球物理、地表基质调查工作,通信地址 河北省廊坊市广阳区广阳道 93 号,E-mail//gwent1229@163.com
通信作者:鲁敏(1991—),男,工程师,从事地表基质调查工作,通信地址 河北省廊坊市广阳区广阳道 93 号,E-mail//lumin@mail.cgs.gov.cn

0 引言

地表基质是当前出露于地球陆域地表浅部或水域水体底部,主要由天然物质经自然作用形成,正在或可以孕育和支撑森林、草原、水、湿地等各类自然资源的基础物质[1-2]. 地表基质层是地表自然资源的承载体和赋存体,按调查开展层次,进一步可划分为表层(0~0.2 m)、浅层(0.2~2 m)、中层(2~5 m)、深层(5~50 m)地表基质. 5m 以浅地表基质层处于生物圈、水圈、大气圈和岩石圈交互的核心位置,包含生产层(土壤层)和生态层(土壤母质层),外部环境与内部条件共同作用形成了其垂向结构,水、气、热、肥等地表基质的理化性质更是由垂向结构直接控制. 华北平原是主要的农业生产区, 主要出露多条河流影响下的冲积土,使得垂向上地表基质层次分布十分复杂[3]. 因此,以 5 m 以浅地表基质层为例,查明刻画垂向结构,有助于水肥迁移等科学研究,并能够为农业的精准化管理及土地利用规划提供依据.

自马尔可夫(Markov)利用转移概率描述随机变量的变化规律后,前人基于马尔可夫链理论,在地质沉积模型识别[4-5]、地层序列分析[6]、土壤类型和质地层次[7-10]、地层变异模拟[11]、土地利用流转及景观格局[12-13]等领域,已经取得大量成果. 地表基质调查[14-17]中,基于地表基质剖面挖掘、工程取样钻揭示后描述总结垂向结构的方法, 对地表基质类型变异和分布特征更多是宏观定性描述. 缺乏定量模型的描述; 地表基质类型垂向变化是确定性、随机性、模糊性共同作用的结果, 现有调查对区域上垂向基质类型变化规律刻画还不够精细, 需要引入合适的数学原理及方法进一步对其精细刻画. 本研究以河北省定兴县为例, 将取样钻岩心编录结果视为不同地表基质类型叠置组合的序列, 引入嵌入转移概率矩阵定量描述地表基质类型的垂向排列规律, 并根据差值矩阵构建最理想情况下的地表基质类型叠置样式.

1 研究区概况及数据采集

定兴县位于河北省保定市中部, 地处冀中平原腹地,总面积为 714.4 km². 研究区地形平坦,总体地势西北高、东南低,大清河水系的拒马河、北易水、中易水河自西向东横贯全境, 水文及工程地质条件良好. 新构造运动活动直接控制了区内的地貌格局与水系展布,研究区地貌类型以冲洪积平原、冲积平原为主, 河漫滩、河床及阶地在河流两侧发育. 第四纪沉积物成因类型相对简单,主要为冲洪积和河流沉积,覆盖厚度一般在数十到数百米(图 1).

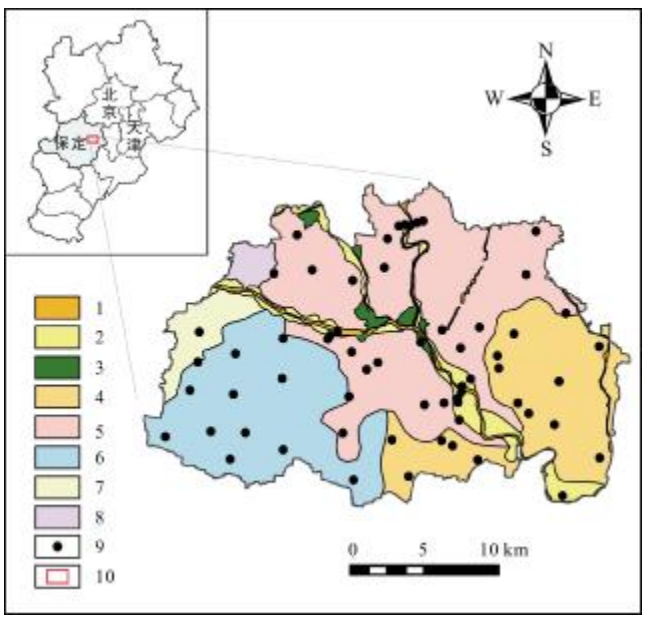

图 1 研究区地貌类型及采样点位分布图

Fig. 1 Landform types and sampling sites in the study area

1—河床(river bed); 2—河漫滩(flood plain); 3—阶地(terrace); 4—冲积洼地(alluvial depression); 5—平坦的冲积平原(flat alluvial plain); 6—倾斜的冲积平原 (sloping alluvial plain); 7—倾斜的冲积洪积平原(sloping alluvial-deluvial plain); 8—起伏的冲积洪积平原 (undulating alluvial-deluvial plain); 9—采样点位(sampling site); 10—研究区(study area)

在定兴县内,根据地貌解译类型,按照地貌分区的原则布设取样钻. 采样点位如图 1 所示. 在揭穿 5 m 以浅地表基质层的 65 个取样钻孔点,取埋深等于或超过 5 m 所处地表基质类型的自然截止深度为底界深度, 统计编录获取得到的 357 个层位的地表基质类型及其层厚信息, 将其作为转移概率统计研究的原始数据. 编录结果表明, 地表基质类型均为为土质基质,按照三级分类可进一步划分为砂土(C2s)、壤质砂土(C2l)、黏质砂土(C2c)、砂质壤土(C3s)、壤土(C3l)、黏质壤土(C3c)、砂质黏土(C4s)、壤质黏土(C4l)、黏土(C4c)等 9 种类型. 考虑到倾斜的冲洪积平原和阶地地貌类型面积较小,且采样点较少,对此两种地貌类型不再分区研究.

2 研究方法

根据定义,当推测后续状态时,影响因素只与当前

状态相关,而与过去状态无关的性质称为马尔可夫性. 马尔可夫链是一组具有马尔可夫性质的离散随机变量的集合. 马尔可夫链理论具体应用到本研究中，表示了沉积作用下，地表基质随深度自下而上从某种类型转变为另一种类型的概率大小，可以认为这是一个因变量地表基质类型只随单一自变量深度变化的一维马尔可夫链. 本研究采用转移概率(Transition Probability)方法定量描述定兴县地表基质垂向上类型变化规律，完成马尔可夫性检验后,根据转移概率的计算结果,开展置换分析、熵分析、差值矩阵与环流分析等转移概率综合分析,从而获取区域地表基质类型的宏观规律.

转移概率计算方式通常可分为连续式和嵌入式两种，即分别以等厚度间隔和地表基质类型实质变化两种方式记录地表基质类型的变化. 考虑到同一种地表基质类型通常是同种环境的产物,地表基质的层数、类型及垂向排序是其最为重要和关键的信息. 对于编录结果而言,厚度信息可以方便地从编录表中获取,出于分析的方便性,统计地表基质类型的实质变化,选取嵌入式转移矩阵方法分析描述地表基质类型的垂向变化特征. 区内地表基质是沉积的产物,因此,依据各取样钻编录结果,自下而上统计地表基质变化情况,可得到与进积方向一致、符合地质成因规律的转移频数矩阵 TFM(N),作为转移概率计算的起点. 嵌入式 TFM(N)的对角线元素均为 0.

$$N=\{N_{ij}\}=\begin{Bmatrix} n_{11} & n_{12} & \cdots & n_{1m} \\ n_{21} & n_{22} & \cdots & n_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ n_{m1} & n_{m2} & \cdots & n_{mm} \end{Bmatrix}$$

$$n_i=\sum_{j=1}^{m} n_{ij}$$

式中，m 为地表基质类型的总数目；n_{ij} 表示相邻两层,地表基质类型 i 出现在类型 j 上面的频数；n_i 为第 i 行元素的总和,表示由第 i 种地表基质类型转变为其他类型的总频数. 将 TFM 中每一行元素均除以该行元素的总和 n_i，即可得地表基质类型垂向向上转移频率矩阵 TPM,其表示某种地表基质类型被其他各种类型上覆的概率.

$$P=\{P_{ij}\}=\begin{Bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mm} \end{Bmatrix}$$

p_{ij} 为第 i 种向第 j 种地表基质类型的转移概率.

2.1　马尔可夫性检验

转移概率分析首先需要进行马尔可夫性检验,即检验逐次发生的事件或状态是否独立. 无效假设是假设地表基质类型之间的转移是相互独立的，如果无效假设不成立，则满足一维马尔可夫链的要求. 换言之，当马尔可夫性检验结果证明无效假设不成立,即地表基质类型之间的垂向转移具有相关性时，可以将地表基质类型的垂向变化视为一维马尔可夫链. 检验标准[18]如下：

$$-2\ln\lambda=2\sum_{i,j=1}^{m} n_{ij}\ln\left(\frac{p_{ij}}{p_j}\right)$$

$$p_j=\sum_{i=1}^{m} n_{ij}/\sum_{i,j=1}^{m} n_{ij}$$

其中，λ 为统计变量；p_j 为 TPM 中第 j 列的边缘概率；m 为研究区地表基质类型总数目. 当无效假设成立时，$-2\ln\lambda$ 渐进服从自由度为 $m(m-1)$的 χ^2 分布. χ^2 分布是由正态分布构造而成的一个新的分布，当自由度很大时，其分布近似为正态分布. 查 χ^2 分布概率表时,按自由度及相应的概率去找到对应的值.

2.2　马尔可夫链平稳性检验

平稳性能够衡量研究变量在连续空间(时间)状态变化情况是否与空间位置(时间)有关,当状态变化与空间位置无关时，称为平稳性马尔可夫链. 检验标准[18]如下：

$$-2\ln\lambda=2\sum_{t=1}^{T}\sum_{i,j=1}^{m} n_{ij}^{(t)}\ln\left(\frac{p_{ij}^{(t)}}{p_j}\right)$$

其中，p_{ij} 为全区内 TPM 的第(i, j)个元素；$p_{ij}^{(t)}$是第 t 个子区间 TPM 的第(i, j)个元素；$n_{ij}^{(t)}$为第 t 个子区间 TFM 中第(i, j)个元素；T 是子区间总数目；m 为地表基质类型总数. 当无效假设成立时，即马尔可夫链是平稳的,则$-2\ln\lambda$ 渐进服从自由度为$(T-1)m(m-1)$的 χ^2 分布，说明子区间内的 TPM 与全区 TPM 相同位置的元素值近似相等.

2.3　置换分析

研究区内不同地表基质类型层次转移的 TPM 各行，可以统计出如下的相似性度量. 对于向上转移的 TPM(P)有

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

其中，p_{ik} 和 p_{jk} 分别表示类型 i 和类型 j 向上转移到 k 的频率，U_{ij} 值越大说明两种基质类型具有相同上层的概率越大. 同理，对于向下转移的 TPM(Q)，相似性度量记为 D_{ij}. 再定义 $C_{ij}=U_{ij}\cdot D_{ij}$，该值越大说明 i 和 j 拥有相同类型的上下层. C_{ij} 越大，则表明两种基质相似性水平越高，说明两者直接发生变化的可能性越大，横向上越不稳定. 若 C_{ij} 很低，则表明该状态较为稳定，可以作为标志层.

2.4 熵分析

地表基质类型的影响和依赖性还可以从转移的熵组值上看出. 定义后熵为向上转移矩阵的熵组

$$H_i(up)=-\sum_{j=1}^{m} p_{ij}\log_2 p_{ij} \quad i=1,2,\cdots,m$$

同理，对 Q 可定义如下的前熵

$$H_i(down)=-\sum_{j=1}^{m} q_{ij}\log_2 q_{ij} \quad i=1,2,\cdots,m$$

这里 q_{ij} 为 Q 的第(i, j)个元素，即第 i 种地表基质类型之下出现第 j 种地表基质类型的概率.

2.5 差值矩阵与环流分析

为最大限度地消除随机因素的干扰，有必要进一步利用环流分析法突出地表基质序列的规律性，找出最符合宏观趋势的主要地表基质序列类型. 环流分析方法可分解为差值矩阵构建和地表基质序列分解模式图两步[19-20].

差值矩阵先由转移频数矩阵 $M=[M_{ij}]$构造一个矩阵 $E=[E_{ij}]$，其中 E_{ij} 表示由状态 i 转移到状态 j 的概率，

$$E=[E_{ij}]=\frac{T_j}{N-S_i}$$

然后用矩阵 DD 来表示转移的倾向，即

$$DD=[D_{ij}]=P_{ij}-E_{ij}$$

差值矩阵反映了地表基质序列中各地表基质类型相互形成组合的倾向，其正值意味着实际观测到的地表基质序列比随机序列更为常见.

3 计算结果

将研究区内的 9 种基质类型选取为转移概率分析的系统状态，计算出定兴县全区及 4 种地貌类型的表层概率分布 A 与向上转移频率矩阵 TPM(P).

$A_{定兴县}$=

(0.000, 0.108, 0.046, 0.354, 0.338, 0.123, 0.031, 0.000, 0.000)

$A_{冲积尘地}$=

(0.000, 0.143, 0.000, 0.214, 0.357, 0.286, 0.000 0.000, 0.000)

$A_{河漫滩}$=

(0.000, 0.167, 0.167, 0.667, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000)

$A_{平坦的冲积平原}$=

(0.000, 0.097, 0.065, 0.452, 0.226, 0.129, 0.032, 0.000, 0.000)

$A_{倾斜的冲积平原}$=

(0.000, 0.000, 0.000, 0.417, 0.5, 0.000, 0.0833, 0.000, 0.000)

$P_{定兴县}$=

0.000	0.109	0.370	0.109	0.043	0.109	0.087	0.109	0.065
0.038	0.000	0.000	0.308	0.038	0.346	0.000	0.231	0.038
0.133	0.033	0.000	0.333	0.133	0.033	0.133	0.117	0.083
0.024	0.095	0.214	0.000	0.214	0.190	0.024	0.119	0.119
0.000	0.000	0.182	0.273	0.000	0.455	0.091	0.000	0.000
0.114	0.229	0.057	0.257	0.143	0.000	0.029	0.057	0.114
0.053	0.053	0.526	0.158	0.053	0.053	0.000	0.053	0.053
0.071	0.036	0.250	0.179	0.143	0.143	0.071	0.000	0.107
0.160	0.280	0.240	0.160	0.000	0.080	0.040	0.040	0.000

$P_{冲积尘地}$=

0.000	0.286	0.286	0.286	0.000	0.000	0.000	0.000	0.143
0.000	0.000	0.000	0.333	0.167	0.167	0.000	0.333	0.000
0.000	0.143	0.000	0.429	0.000	0.000	0.000	0.000	0.429
0.000	0.200	0.000	0.000	0.300	0.300	0.100	0.000	0.100
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.222	0.333	0.000	0.000	0.111	0.333
0.000	0.000	0.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.500
0.250	0.000	0.250	0.000	0.000	0.250	0.000	0.000	0.250
0.273	0.091	0.273	0.091	0.000	0.091	0.091	0.091	0.000

$P_{河漫滩}$=

0.000	0.111	0.333	0.000	0.111	0.111	0.111	0.222	0.000
0.000	0.000	0.000	0.500	0.000	0.500	0.000	0.000	0.000
0.333	0.000	0.000	0.333	0.333	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.500	0.000
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.500	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.500	0.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.667	0.000	0.000	0.000	0.000	0.333	0.000	0.000
0	0	0	0	0	0	0	0	0

$P_{平坦的冲积平原}$=

0.000	0.077	0.308	0.115	0.038	0.154	0.115	0.115	0.077
0.067	0.000	0.000	0.267	0.000	0.333	0.000	0.267	0.067
0.143	0.000	0.000	0.286	0.036	0.071	0.179	0.214	0.071
0.056	0.056	0.278	0.000	0.222	0.111	0.000	0.111	0.167
0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.154	0.308	0.000	0.308	0.077	0.000	0.000	0.077	0.077
0.100	0.100	0.500	0.200	0.000	0.000	0.000	0.100	0.000
0.056	0.056	0.222	0.167	0.167	0.167	0.056	0.000	0.111
0.077	0.462	0.154	0.231	0.000	0.077	0.000	0.000	0.000

$P_{倾斜的冲积平原}$=

0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.333	0.000	0.667	0.000	0.000	0.000
0.056	0.059	0.000	0.353	0.294	0.000	0.176	0.059	0.000
0.000	0.000	0.400	0.000	0.200	0.200	0.000	0.200	0.000
0.100	0.200	0.200	0.300	0.100	0.000	0.100	0.000	0.000
0.000	0.000	0.800	0.000	0.000	0.200	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.667	0.333	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.160	0.280	0.240	0.160	0.000	0.080	0.040	0.040	0.000

不同地貌类型内矩阵 A、P 的差异反映了地貌对地表基质垂向分布的影响，不同地貌单元内的地表基质类型特征不尽相同. 冲积洼地与平坦的冲积平原地貌内 9 种地表基质类型均有出现；河漫滩内缺失壤土基质、黏土基质;倾斜的冲积平原缺少黏土基质. 表层地表基质类型以中等颗粒为主,砂土基质、壤质黏土基质、黏土基质在地表均未出现. 平坦的冲积平原区内的基质类型最为丰富,以砂质壤土基质为主体;倾斜的冲积平原与河漫滩的地表基质类型最少，主要的类型为壤土基质、砂质壤土基质;冲积洼地集中表现为砂质壤土和二级分类的壤土类型. 按照地表基质表层颗粒粗细程度,从粗到细,分别为河漫滩、冲积洼地、倾斜的冲积平原、平坦的冲积平原.

3.1　马尔可夫性检验结果

定兴县全区马尔科夫性检验结果 $-2\ln\lambda$ = 196.6207，自由度为 n=9×(9-1)=72. 依据统计学上约定俗成的习惯,取显著水平 a=0.05，$\chi^2_{(72)0.05}$=92.808,远小于 $-2\ln\lambda$. 结果说明,$-2\ln\lambda$ 服从自由度为 72 的 χ^2 分布的把握仅有 5%,表明了认为无效假设(地表基质类型之间的转移相互独立)成立的可信度仅有 5%,而有 95%的把握认为无效假设不成立,反映了定兴县全区地表基质类型马尔可夫性明显，满足可视为一维马尔可夫链的要求.

3.2　马尔可夫平稳性检验结果

冲积洼地、河漫滩、平坦的冲积平原、倾斜的冲积平原 4 种地貌类型马尔可夫平稳性检验结果分别为 87.6732、47.5472、127.9808、74.9570. 划分 4 个子区间时,自由度为(4-1)×9×(9-1)=216. 当显著水平 a=0.05，$\chi^2_{(216)0.05}$ 为 251.286，均大于 4 个子区的平稳性检验结果,表明了认为无效假设(子区域的 TPM 与全区域 TPM 的差异不明显）不成立的可信度仅有 5%,而有 95%的把握认为无效假设成立,说明 4 个子区域的 TPM 与定兴县的 TPM 对应元素相似. 因此,可认为整个定兴县内地表基质类型垂向变化的马尔可夫链是平稳的，在后续分析中将定兴县作为一个整体进行下步分析.

3.3　置换分析结果

针对全区，计算地表基质向上垂向转移的相似性度量 U、向下垂向转移的相似性度量 D、总垂向转移的相似性度量 C,并可根据 U、D、C 矩阵数值做出各地表基质类型的谱系图. 谱系图(图 2)中,越靠上,相邻两种地表基质类型越能相互替换，越具有较高的相似水平.

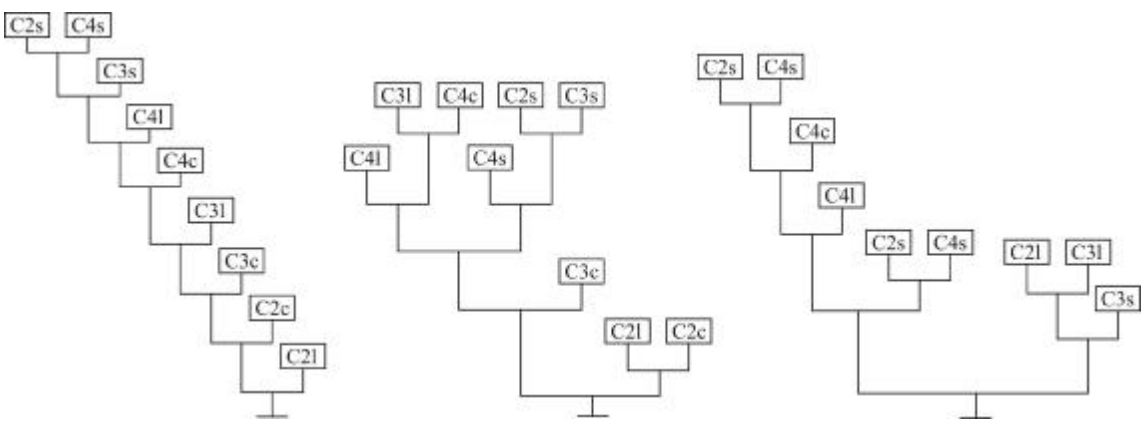

图 2　地表基质类型垂向谱系图

Fig. 2　Vertical spectrum of ground substrate types

U=

1.000	0.647	0.270	0.915	0.732	0.332	0.809	0.664	0.733
	1.000	0.653	0.545	0.610	0.426	0.480	0.553	0.691
		1.000	0.333	0.496	0.617	0.454	0.532	0.614
			1.000	0.708	0.492	0.876	0.799	0.761
				1.000	0.603	0.723	0.778	0.973
					1.000	0.424	0.772	0.632
						1.000	0.754	0.770
							1.000	0.817
								1.000

D=

1.000	0.433	0.411	0.784	0.611	0.522	0.935	0.852	0.776
	1.000	0.684	0.503	0.815	0.492	0.289	0.563	0.399
		1.000	0.386	0.481	0.822	0.330	0.654	0.504
			1.000	0.551	0.522	0.663	0.807	0.568
				1.000	0.353	0.508	0.733	0.505
					1.000	0.449	0.674	0.764
						1.000	0.829	0.723
							1.000	0.704
								1.000

C=

1.000	0.280	0.111	0.718	0.447	0.173	0.756	0.566	0.569
	1.000	0.447	0.274	0.497	0.210	0.139	0.311	0.275
		1.000	0.129	0.239	0.507	0.150	0.348	0.309
			1.000	0.390	0.257	0.581	0.645	0.432
				1.000	0.213	0.367	0.571	0.492
					1.000	0.191	0.520	0.483
						1.000	0.625	0.557
							1.000	0.576
								1.000

3.4 熵分析结果

定兴县全区地表基质类型间的影响大小关系可以从熵值计算结果(表 1)中看出.

表 1 熵分析结果

Table 1 Results of entropy analysis

H(down)	地表基质类型(i)	H(up)
2.683	C2s	2.392
2.084	C2l	2.477
2.679	C2c	2.513
2.719	C3s	2.680
1.790	C3l	2.436
2.725	C3c	2.733
2.249	C4s	2.281
2.807	C4l	2.519
2.517	C4c	2.608

砂质壤土的前后熵均较大，表明该地表基质类型的变化最大，在地表基质序列中是最随机或最不确定的事件. 壤质砂土、壤土的前熵明显小于其后熵,其余各地表基质类型的前后熵非常接近. 整体来说，$H(\text{down})\approx H(\text{up})$,表明地表基质序列具有一定的对称性,可认为是水流多次将细颗粒垂向加积的结果.

3.5 差值矩阵与环流分析结果

为便于找出宏观规律，取差值矩阵元素 0.024 作为阈值,舍掉小于阈值实际观测到的地表基质组合.

DD=

-0.085	-0.005	0.154	-0.123	-0.078	-0.038	0.014	-0.001	-0.024
-0.040	-0.105	-0.199	0.093	-0.074	0.211	-0.068	0.129	-0.044
0.043	-0.087	-0.228	0.088	0.004	-0.122	0.056	0.000	-0.011
-0.060	-0.017	0.002	-0.228	0.094	0.046	-0.048	0.011	0.031
-0.075	-0.100	-0.007	0.070	-0.107	0.326	0.027	-0.096	-0.078
0.033	0.120	-0.149	0.035	0.026	-0.140	-0.041	-0.048	0.029
-0.024	-0.050	0.332	-0.051	-0.057	-0.079	-0.066	-0.046	-0.028
-0.008	-0.070	0.049	-0.037	0.029	0.006	0.003	-0.102	0.024
0.081	0.175	0.041	-0.053	-0.112	-0.055	-0.027	-0.061	-0.082

从研究区实际出发，由于黏土可认为是代表弱水动力条件下的产物，黏土作为一个完整地表基质序列的起点和终点,进而结合向上转移概率矩阵 P 和差值矩阵 DD 做出基质优先转移路线图（图 3）. 根据环流量 a 的大小分解所有可能的序列类型，并选择环流量较大的地表基质序列作为主要序列类型.

① C2s–C2c–C3s–C3l a=0.088

② C2s–C2c–C2s–C2c–C3s–C3l a=0.043

③ C2s–C2c–C4s–C2c–C3s–C3l a=0.056

④ C2s–C2c–C2s–C2c–C4s–C2c–C4s–C2c–C2s–C2c–C3s–C3l a=0.043

⑤ C2l–C3c–C2l–C3c–C3s–C3l a=0.046

⑥ C2l–C3s–C3c–C3s–C3l–C3c a=0.046

4 讨论

马尔可夫稳定性检验的结果表明，将定兴县作为一个整体进行分析是合理的，但比对各地貌单元内地表基质组合的异同仍有一定意义，因此基于转移概率矩阵初步梳理的结果，对此进行初步讨论. 各地貌类型内地表基质间垂向结构叠置关系上，倾斜的冲积平原内 P_{73}=0.8，表明主要的类型组合为砂质黏土基质–黏质砂土基质；P_{43} 与 P_{34} 数值接近,表明黏质砂土基质

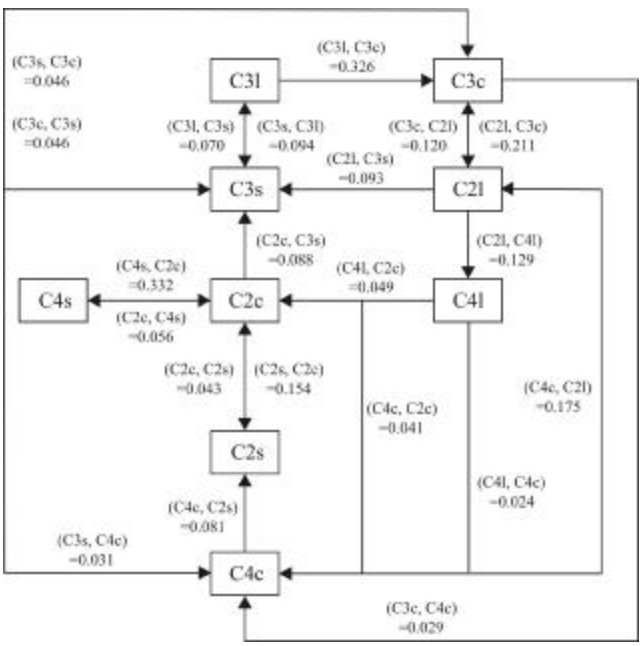

图 3　转移矩阵视角下的地表基质转换关系图解

Fig. 3　Diagram for ground substrate transformation relation from the perspective of transition matrix

与壤质砂土基质多以互层形式出现. 河漫滩地貌内，转移概率矩阵第一行内元素较分散，转移频数矩阵内第一行元素总和与矩阵元素总和的比值为 9/26,体现了砂土基质为底，上部沉积中细颗粒基质且上部基质类型变化较为剧烈的特征，河漫滩内以砂土基质-其他基质垂向组合为主. 平坦的冲积平原地貌区域内，P_{92}、P_{26} 数值相对较大，体现了黏土基质-壤质砂土基质-黏质壤土基质的组合规律；P_{43} 与 P_{34} 数值接近,表明黏质砂土基质与壤质砂土基质多以互层形式出现，这一互层特征与倾斜的冲积平原地貌类似. 冲积洼地地貌单元内，P_{34}、P_{46} 数值相对较大，体现了黏质砂土基质-砂质壤土基质-黏质壤土基质的组合规律. 冲积洼地、河漫滩内表现为正粒序特征,即地表基质质地随着沉积过程，由深至浅粒度逐渐变细. 河漫滩内表现为以颗粒最粗的砂土为底，其上地表基质类型为细颗粒的垂向组合特征,垂向变化剧烈;冲积洼地内的地表基质类型与河漫滩的相比质地更细，向上质地变化较为连续. 平坦的冲积平原及倾斜的冲积平原内，黏质砂土基质与壤质砂土基质均以互层形式出现. 平坦的冲积平原地貌占定兴县绝大多数面积，从转移概率矩阵整体上看该地貌与全区转移概率矩阵同位置元素变化趋势较为一致. 分析 4 个地貌分区的地表基质转移概率矩阵,与实际编录结果对比验证,表明本研究具有较好的可信度. 各地貌单元内的地表基质组合典型类型的代表钻孔如图 4 所示.

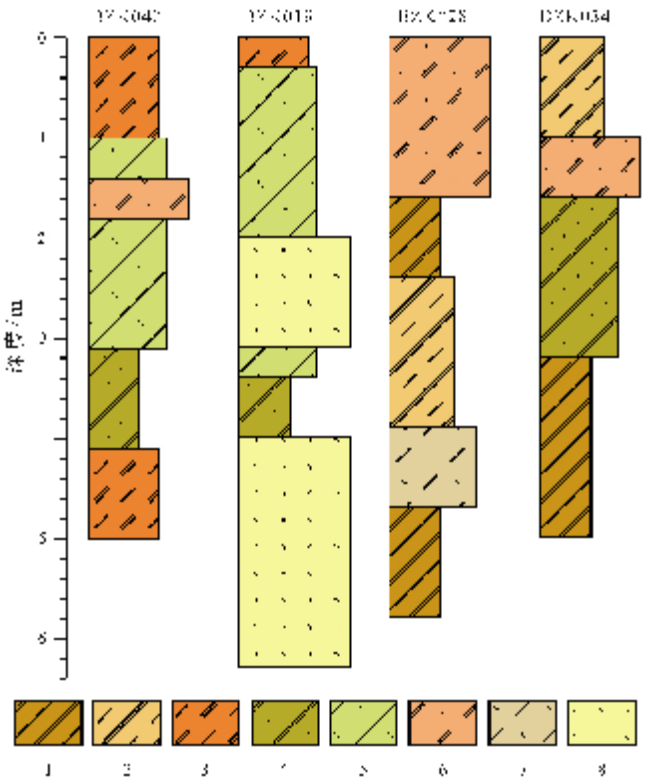

图 4　各地貌单元内地表基质组合典型类型

Fig. 4　Typical types of ground substrate assemblage in various geomorphic units

BZK040—倾斜的冲积平原（sloping alluvial plain）；BZK019—河漫滩(flood plain)；BZK028—平坦的冲积平原(flat alluvial plain)；BZK034—冲积洼地(alluvial depression)；1—黏土基质(clay substrate)；2—壤质黏土基质(loamy clay substrate)；3—壤土基质(soil substrate)；4—砂质黏土基质(sandy clay substrate)；5—黏质砂土基质(clay sand substrate)；6—砂质壤土基质(sandy loam substrate)；7—壤质砂土基质(loamy sand substrate)；8—砂土基质(sand substrate)

从全区范围看，地表基质类型按照二级分类以壤土类为主体,砂土类次之,黏土类最少;砂土类中主要表现为黏质砂土. 区域内中层地表基质层以砂质壤土、黏质砂土、黏质壤土等中颗粒类型为主,反映了区域内大部分地区地表基质形成于水动力条件中等的环境下.

垂向组合上，某些特定地表基质类型会以组合形式出现,利用熵分析、置换分析和向上转移概率矩阵提供的综合信息，刻画地表基质组合特征. 由地表基质

向上垂向转移的相似性度量 U 可知，U_{13}=0.27 为最小值，表明砂土、黏质砂土为最稳定层位；熵分析结果中，砂土的前驱状态明显大于后继状态，表明其向上沉积形成的状态要更为稳定；在向上转移矩阵 P 中，砂土向上转移到黏质砂土概率最高，因而判断黏质砂土上覆于砂土上部. U_{34}=0.333，黏质砂土、砂质壤土为稳定层位，黏质砂土向砂质壤土向上转移概率为 0.333，因而砂质壤土状态应出现于黏质砂土之后，表现为砂质壤土上覆于黏质砂土上部. 此外，注意到 C3l 的前熵明显小于其后熵，表明其下伏与上覆地层相比具有更为明显的确定性；Q_{54}=0.3，为该行最大值，表明壤土基质下伏基质更多表现为砂质壤土，最后形成砂土–黏质砂土–砂质壤土–壤土基质典型代表组合. U_{26}=0.426，表明壤质砂土、黏质壤土为较稳定层位. 壤质砂土向上转移到黏质壤土概率为 0.346，壤质砂土前驱状态明显小于后继状态，表明其下伏基质相比上覆基质，类型更为确定. 壤质砂土向下转移至黏质壤土概率最大，为 0.286，说明壤质砂土与黏质壤土表现为互层，壤土–黏土基质组合形成了一个闭旋回.

横向变化特征上，在代换谱系图上，壤土与黏土基质、砂土与砂质黏土基质均可互换，表明两者有共同的居前和既后状态，二者能够相互替代说明了地表基质层位变化的不稳定性；互置换矩阵中，C_{17} 最大，表明砂土与砂质黏土常常紧密共生，有着共同的上覆和下伏基质. 这种可替代性也反映在互代换谱系图上，地表基质类型相差较大的砂土、砂质黏土、砂质壤土基质反映出横向地表基质类型变化上的不稳定性，同一、二级分类下的地表基质类型较为相似，壤质黏土与黏土、壤土与黏质壤土、黏质砂土与壤土的可互换性反映了地表基质类型变异性较小，稳定性和均一性都较好. 宏观上看，质地由细变粗，横向上稳定性变强.

沉积相与地表基质类型间的关系上，区内存在多条现代河流，刘智荣等[21]利用岩性和粒度分析结果表明区内为曲流河冲积沉积，曲流河在平原区的摆动塑造了地表基质层以河流沉积体系为主的沉积体系，区内沉积相以河流相为主. 洪水猛烈暴涨淹没河床范围大，河流沉积物颗粒粗；河流缓慢上涨滞留于洼地，静水沉积产生的颗粒物质地较细，养分丰富[22]. 河道亚相表现为厚层砂土基质、壤质砂土基质. 河道边缘的堤坝亚相以中细颗粒为主，其中天然堤微相表现为壤质砂土基质、砂质壤土基质互层的特征. 决口扇微相表现为以壤质黏土–壤质砂土基质、砂质黏土–黏质砂土基质、壤土–砂质壤土基质组合为代表的上粗下细的垂向结构；泛滥平原亚相颗粒类型偏细，形成区内分布较广的中厚层的黏质砂土、砂质壤土、壤土基质，氧化环境下沉积形成的地表基质富集了大量的有机质，适宜农业耕作.

区内最完整的地表基质序列，通过环流分析可知为砂土–黏质砂土–砂质黏土–砂质壤土–壤土–黏质壤土–壤质砂土–壤质黏土–黏土，其环流量为 a=0.024. 由于其环流值较小，同时受研究范围实际厚度制约，在实际编录结果中未有完整体现，但这对宏观认识区内的沉积趋势仍然具有理论意义. 砂质黏土属于水动力条件较弱环境中的产物，砂土、壤质砂土及黏质砂土属于水动力条件很强环境中的产物，这个理论上的完整地表基质序列可以表征区内 0~5 m 范围内水动力条件变化强—弱—强—中等—强—弱的沉积过程.

取样钻孔编录可视作地表基质序列的局部片段，经过环流分析法，得到可能的 2 类 6 种地表基质序列. 不满足上述地表基质序列的可认为是随机性的类型转移，不反映地表基质整体的转移趋势. 同时，注意到随机性的转移通常分布在取样钻编录的上层. 区内的地表基质序列以 4~7 个岩性组合的中等序列为主. 序列 1—序列 4 可认为是区内主要的地表基质序列，可概括为砂土–黏质砂土–砂质壤土–壤土型，合计有 19 个钻孔，环流量相对较大. 序列 1 为基本的地表基质序列，序列 2—序列 4 实质与序列 1 相似，只是在序列 1 基本地表基质序列中嵌入了砂土（砂质黏土）–黏质砂土次级序列，序列 4 则是两种次级序列进一步相互嵌套的结果. 序列 5 和序列 6 可概括为壤质砂土–黏质壤土型.

5 结论

1）转移概率分析结果表明，地表基质垂向组合特征与地貌关系密切. 砂土–黏质砂土–砂质壤土–壤土为区内典型代表组合，壤质砂土–黏质壤土为次级组合类型. 环流分析获得的区内理想的最完整的地表基质序列表征了区内 0~5 m 范围内水动力条件变化强—弱—强—中等—强—弱的沉积过程. 环流分析环流量总体相对较小，说明地表基质受多种复杂成因因

素的影响,其类型剧烈变化.

2）不同地貌单元内的地表基质类型特征不尽相同. 地貌控制了地表基质类型. 河漫滩内表现为以颗粒最粗的砂土为底，其上地表基质类型为细颗粒的垂向组合特征,垂向变化剧烈;冲积洼地内的地表基质类型与河漫滩的相比质地更细,向上质地变化较为连续. 平坦的冲积平原及倾斜的冲积平原内，黏质砂土基质与壤质砂土基质均多以互层形式出现.

3）基于转移概率的数学方法,建立了区内的地表基质类型垂向转换方向，定量刻画了地表基质的组合类型特征，反映中层地表基质层的沉积动力环境. 转移概率方法能够从大量繁杂的编录中获取区域内的宏观规律.

参考文献(References):

[1]自然资源部. 自然资源调查监测体系构建总体方案[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020 -01/18/content_5470398.htm?eqid=e54ad81800032f580000000264701404/2023-10-24.
Ministry of Natural Resources. The general scheme for construction of natural resources survey and monitoring system[EB/OL]. https://www gov.cn/zhengce/zhengceku/2020 -01/18/content_5470398.htm? eqid = e54ad81800032f580000000264701404/2023-10-24.

[2]葛良胜，杨贵才. 自然资源调查监测工作新领域：地表基质调查[J]. 中国国土资源经济，2020，33(9)：4-11，67.
Ge L S, Yang G C. New field of natural resources survey and monitoring: Ground substrate survey[J]. Natural Resource Economics of China, 2020, 33(9): 4-11, 67.

[3]Li W D, Li B G, Shi Y C. Markov-chain simulation of soil textural profiles[J]. Geoderma, 1999, 92(1/2): 37-53.

[4]王秋良，李长安. 马尔柯夫链在江汉平原第四纪沉积环境分析中的应用[J]. 地质科技情报，2008，27(1)：38-41，46.
Wang Q L, Li C A. Markov chain in Quaternary sedimentary environment of Jianghan Plain[J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(1): 38-41, 46.

[5]聂琼，项伟，杜水祥，等. 马尔可夫链在小南海坝基软弱夹层分析中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2014，45(4)：1205-1213.
Nie Q, Xiang W, Du S X, et al. Application of Markov chain in analyzing weak intercalation in dam foundation of Xiao Nanhai[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(4): 1205-1213.

[6]张成凤，吕洪波，夏邦栋，等. 南盘江盆地中三叠统复理石韵律的马尔科夫链特征及其地质意义[J]. 地质论评，2011，57(5)：632-640.
Zhang C F, Lü H B, Xia B D, et al. Markov chain simulation on the rhythmic sequences of Middle Triassic flysch in Nanpanjing basin, SW China[J]. Geological Review, 2011, 57(5): 632-640.

[7]李丹凤，邵明安. 一维马尔可夫链模拟黑河中游流域土壤质地垂向变异[J]. 农业工程学报，2013，29(5)：71-80.
Li D F, Shao M A. One-dimensional Markov chain simulation of vertical change of soil texture in middle reaches of Heihe River, northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(5): 71-80.

[8]李丹凤. 黑河中游绿洲土壤物理性质的时空变异性研究[D]. 咸阳：中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心)，2014.
Li D F. Study on the spatial and temporal variability of soil physical properties in the middle basin oasis of the Heihe River[D]. Xianyang: Institute of Soil and Water Conservation of Chinese Academy of Sciences, 2014.

[9]王绍武，沈润平，陈萍萍，等. 基于马尔可夫链模型的华中地区土壤质地空间分布模拟研究[J]. 河南农业大学学报，2019，53(2)：282-288.
Wang S W, Shen R P, Chen P P, et al. Simulation study on spatial distribution of soil texture based on Markov-chain model in Central China[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2019, 53(2): 282-288.

[10]陈冲. 土壤水分特征曲线的预测及土壤属性三维空间制图[D]. 北京：中国农业大学，2015.
Chen C. Estimation of soil water retention curve and three dimensional mapping of soil properties[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.

[11]祁小辉，李典庆，周创兵，等. 基于钻孔资料的耦合马尔可夫链水平方向转移概率矩阵估计[J]. 应用基础与工程科学学报，2017，25(5)：967-984，doi：10.16058/j.issn.1005-0930.2017.05.009.
Qi X H, Li D Q, Zhou C B, et al. Estimation of horizontal transition probability matrix for coupled Markov chain based on borehole data [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(5): 967-984, doi: 10.16058/j.issn.1005-0930.2017.05.009.

[12]黎治华，高志强，高炜，等. 中国 1999-2009 年土地覆盖动态变化的时空特点[J]. 农业工程学报，2011，27(2)：312-322.
Li Z H, Gao Z Q, Gao W, et al. Spatio-temporal feature of land use/land cover dynamic changes in China from 1999 to 2009[J]. Transactions of the CASE, 2011, 27(2): 312-322.

[13]邱凤婷，过志峰，张宗科，等. 大湄公河次区域植被覆盖时空变化特征及其与气象因子的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，2022，46(2)：187-195.
Qiu F T, Guo Z F, Zhang Z K, et al. Spatio-temporal change characteristics of vegetation coverage and its relationship with meteorological factors in the Greater Mekong Subregion[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022, 46

(2): 187-195.

[14]侯红星, 葛良胜, 孙肖, 等. 地表基质在中国黑土地资源调查评价中的应用探讨——基于黑龙江宝清地区地表基质调查[J]. 自然资源学报, 2022, 37(9): 2264-2276.
Hou H X, Ge L S, Sun X, et al. A study on the application of ground substrate in the survey and evaluation of China's black soil resources: Based on ground substrate survey in Baoqing, Heilongjiang Province[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(9): 2264-2276.

[15]侯红星, 张蜀冀, 鲁敏, 等. 自然资源地表基质层调查技术方法新经验——以保定地区地表基质层调查为例[J]. 西北地质, 2021, 54(3): 277-288.
Hou H X, Zhang S J, Lu M, et al. Technology and method of the ground substrate layer survey of natural resources: Taking Baoding area as an example[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(3): 277-288.

[16]李响, 周效华, 相振群, 等. 地表基质调查的工作思路刍议: 以海南岛为例[J]. 地质通报, 2023, 42(1): 68-75.
Li X, Zhou X H, Xiang Z Q, et al. Simply discussion on the work of ground substrate survey: Taking Hainan Island as an example[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(1): 68-75.

[17]殷志强, 秦小光, 张蜀冀, 等. 地表基质分类及调查初步研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 8-14.
Yin Z Q, Qin X G, Zhang S J, et al. Preliminary study on classification and investigation of surface substrate[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(6): 8-14.

[18]Anderson T W, Goodman L A. Statistical inference about Markov chains[J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1957, 28(1): 89-110.

[19]吕洪波, 夏邦栋. 浙西上奥陶统复理石韵律的马尔可夫链模拟[J]. 石油与天然气地质, 1987, 8(2): 219-230.
Lü H B, Xia B D. Markov chain simulation on flysch rhythmic sequences of the Upper Ordovician in west Zhejiang[J]. Oil & Gas Geology, 1987, 8(2): 219-230.

[20]张光前, 刘承祚. 环流分解及其在沉积地层旋回分析中的应用[J]. 地质科学, 1989, 24(3): 288-296.
Zhang G Q, Liu C Z. Circulation decomposition and the application to cyclic analysis for a stratigraphic sequence[J]. Scientia Geologica Sinica, 1989, 24(3): 288-296.

[21]刘智荣, 薛怀宇, 王昌盛. 河北平原中部保定西伯章剖面晚第四纪沉积特征及其环境意义[J]. 地质力学学报, 2021, 27(6): 1011-1023.
Liu Z R, Xue H Y, Wang C S. Late Quaternary depositional characteristics and environment significance of the Xibozhang section in Baoding, central Hebei Plain, China[J]. Journal of Geomechanics, 2021, 27(6): 1011-1023.

[22]辛亮亮. 土壤剖面构型改良与耕地质量提升研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2015.
Xin L L. Research on soil profile pattern improvement and cultivated land quality promotion[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.