

利用马尔科夫过程模拟和预测土壤 侵蚀的动态演变*

——以安徽省岳西县为例

李德成 徐彬彬 石晓日

(中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

摘要 本文根据安徽省岳西县1958—1982—1992年三个时期的遥感资料所编制的土壤侵蚀图,用点数转化法定量地分析岳西县上述两个阶段侵蚀演变和侵蚀类型之间的相互转化状况,确定相应的初始状态下(1958和1982)的转移概率矩阵,应用马尔科夫过程模拟和预测岳西县土壤侵蚀及其格局的动态演变过程和未来演变趋势。

关键词 土壤侵蚀,马尔科夫过程,模拟和预测

1 前言

遥感技术和地理信息系统的发展,已使模型分析和预测在资源和环境动态研究中的应用日趋得到重视,并已成为当今地学研究的重要内容^[1,2]。

我国的土壤侵蚀非常严重,每年流失的土壤约 $30 \times 10^8 \text{t}$ ^[3]。因此,开展土壤侵蚀的动态研究,对于加强水土保持、制止土地退化和改善生态环境,具有重要的意义。

本研究的目的是探讨利用马尔柯夫过程模拟一定区域内土壤侵蚀的动态演变过程,定量地分析其演变的特点和预测其未来的演变趋势,并对历年来该区域水土保持工作的成效进行客观地评估,以为其今后水土保持规划和措施的制订提供科学依据。

2 研究方法

本研究选择地处大别山区的安徽省岳西县为研究区,利用由该县不同年代的遥感信息资料所编制出的相应的土壤侵蚀图,分析每个阶段中侵蚀类型之间的相互转化情况,确定相应的侵蚀类型**之间相互转化的初始转移概率矩阵,然后利用马尔柯夫过程模拟岳西县土壤侵蚀的动态演变过程并预测其未来的演变趋势。

* 岳西县多时相土壤侵蚀图的编制(见2.2节)是全国农业区划委员会资助项目《中国南方山地丘陵区土壤侵蚀的动态监测及其对生产力的影响和对策》(1990—1992年)中的一部分。该项目由史德明教授主持,笔者均为该项目组的成员。本研究为该项目的进一步工作成果。

** 本文中侵蚀类型均按侵蚀程度划分。

收稿日期:1994年5月9日;收到修改稿日期:1994年7月26日

2.1 研究区概况

岳西县地处安徽省西南边境, 介于东径 $115^{\circ}50'$ — $116^{\circ}33'$, 北纬 $30^{\circ}39'$ — $31^{\circ}11'$ 之间, 总面积为 2374.69km^2 。

岳西县地貌格局大致为“八山一水半分田, 半分道路和庄园”。其地势自西北向东南呈阶梯式倾斜下降, 构成以中、低山为主体, 沿北、东、南 3 个方向呈放射状分布着河流、谷地、山前丘陵和山间小盆地等不同地貌, 属北亚热带季风气候区, 年均气温为 14.5°C , 年均降雨量为 1420.9mm ; 土壤类型主要为水稻土、山地黄棕壤、山地棕壤等; 植被则以马尾松、栎类为主。

岳西县境内有由花岗片麻岩、角闪片麻岩、角闪岩等所组成的低山丘陵区的植被, 历史上曾多次受到人为干扰, 属花岗片麻岩区水土流失相对较为严重的地区。水土流失不仅引起当地土壤的退化, 也制约着其经济的发展和人民生活的改善。因此, 选择岳西县作为研究区, 具有学科上和社会经济上的双重意义。

2.2 多时相土壤侵蚀图的编制

根据岳西县 1958 年的 1:5 万黑白航空像片、1982 年的 1:4 万黑白航空像片、1992 年的卫星磁带数据和相应的地形图等资料, 按统一的侵蚀强度分类系统(表 1), 经判读、检验、修编、转绘, 分别编制出 3 个年代相应的 1:10 万土壤侵蚀图, 并以此作为研究的基础图件。

表 1 侵蚀强度分类

Tab. 1 Classification of erosion intensity

| 侵蚀类型 | 年均侵蚀模数 ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)* | 判读标志 |
|--------|---|------------------------|
| 1. 非侵蚀 | — | 水田, 水平旱地, 水域, 建筑物 |
| 2. 无明显 | <500 | 植被盖度 >90%, 坡度 <5° |
| 3. 轻度 | 500—2500 | 植被盖度 70—90%, 坡度 5—8° |
| 4. 中度 | 2500—5000 | 植被盖度 50—70%, 坡度 8—15° |
| 5. 强度 | 5000—8000 | 植被盖度 30—50%, 坡度 15—25° |
| 6. 极强度 | 8000—13500 | 植被盖度 10—30%, 坡度 25—35° |
| 7. 剧烈 | >13500 | 植被盖度 <10%, 坡度 >35° |

* 年均侵蚀模数的数据来源: 长江流域规划办公室规划设计处, 《关于长江流域水土保持若干技术标准(暂行规定)》, 1983 年 10 月。

2.3 马尔柯夫过程简介

马氏过程是在不相互独立事件的研究方面提出的一种概率模型。它将研究对象看作一个独立系统, 在一系列特定的时间间隔下, 由已知的系统在 t_1 时刻所处的状态, 根据概率推知系统在 t_2 时刻所处的状态。

在马氏过程中, 较简单的是一重马尔柯夫过程, 这种转化过程要求系统在 t_2 时刻所处的状态只与 t_1 时刻所处的状态有关, 而与 t_1 时刻以前所处的状态无关。这对于研究土壤侵蚀的动态演变较为适宜, 因为在一定条件下, 侵蚀的动态演变具有马氏过程的性质: (1) 一定区域内, 不同侵蚀类型之间具有相互可转化性; (2) 侵蚀类型之间的相互转化过程包含着较多尚难用函数关系准确描述的事件。

马氏过程的具体运算程序详见有关的数理统计和计算机方面的书^[4,5], 本文不再赘述。

3 转移概率矩阵的确定

利用马氏过程的关键, 在于确定侵蚀类型之间相互转化的初始转移概率矩阵 P , 其数学表达式一般为:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1j} & \cdots & P_{1N} \\ P_{i1} & P_{i2} & \cdots & P_{ij} & \cdots & P_{iN} \\ P_{N1} & P_{N2} & \cdots & P_{Nj} & \cdots & P_{NN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中, N 为研究区侵蚀类型的数目, P_{ij} 为侵蚀类型 i 转化为侵蚀类型 j 的概率, P_{ij} 满足以下两个条件: $0 \leq P_{ij} \leq 1$; $\sum_{j=1}^N P_{ij} = 1$ 。

在地学研究中, 常以转移频率来近似地替代转移概率^[4,5]。本研究以不同年代的土壤侵蚀图为基础, 因此, 采用侵蚀类型之间的年均转化率来替代其转移概率。考虑到岳西县 3 个年代土壤侵蚀图的图斑不规则性以及土壤侵蚀信息系统的采用 (点数法的实质是栅格数据采集中的中心点法), 本研究采用点数转化法来确定侵蚀类型之间相互转化的初始概率矩阵^[6]。

本研究采用 1cm 间距的透明网格, 在 3 个年代的土壤侵蚀图上, 按年代顺序分别记录县境内每个格网点位 (共 2000 个点位, 点密度为 0.85 点/cm²) 所对应的侵蚀类型, 统计出各侵蚀类型所占的点数以及侵蚀类型之间相互转化的点数 (表 2)。

表 2 1958—1982—1992 年侵蚀类型之间的转化状况 (点)

Tab. 2 Transition among erosion types during 1958—1982—1992 (Point)

| 侵蚀类型 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | Σ | % |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|----|---|----------|-------|
| 1 | 238 | 2 | 16 | 40 | 6 | 0 | 0 | 302 | 15.10 |
| | 504 | 0 | 42 | 26 | 0 | 0 | 0 | 572 | 28.60 |
| 2 | 18 | 78 | 114 | 136 | 38 | 4 | 0 | 388 | 19.40 |
| | 2 | 107 | 47 | 2 | 0 | 0 | 0 | 158 | 7.90 |
| 3 | 136 | 56 | 132 | 28 | 110 | 6 | 0 | 468 | 23.40 |
| | 7 | 77 | 209 | 21 | 2 | 0 | 0 | 316 | 15.80 |
| 4 | 96 | 20 | 42 | 436 | 62 | 4 | 0 | 660 | 33.00 |
| | 26 | 7 | 374 | 263 | 0 | 0 | 0 | 670 | 33.50 |
| 5 | 84 | 2 | 12 | 30 | 48 | 2 | 0 | 178 | 8.90 |
| | 11 | 7 | 134 | 102 | 10 | 0 | 0 | 264 | 13.20 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 4 | 0.20 |
| | 0 | 11 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 18 | 0.90 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0.10 |
| Σ | 572 | 158 | 316 | 670 | 264 | 18 | 2 | 2000 | 100 |
| | 550 | 209 | 806 | 422 | 12 | 0 | 1 | 2000 | 100 |

表 2 中每一格均有上、下两栏数字, 上栏和下栏的数字分别反映 1958—1982 年和 1982—1992 年两个阶段中侵蚀类型之间的相互转化情况; 第 i 行的数字分别代表着两个

阶段中由侵蚀类型 i 转化为其它侵蚀类型的点数, 第 j 列的数字分别代表着两个阶段中由其它侵蚀类型转化为侵蚀类型 j 的点数, 而左上至右下对角线上的数字则分别代表着两个阶段中各侵蚀类型自身未转化的点数。

根据表 2, 可分别计算出两个阶段中相应的侵蚀类型之间相互转化的年均转化率, 即转移概率。表 3 为岳西县 1958—1982—1992 年两个阶段中, 土壤侵蚀类型之间相互转化的初始转移概率矩阵, 其说明同表 2, 只是它以年均转化率表示。

表 3 1958 和 1982 年初始状态下转移概率矩阵 ($\times 10^{-4}$)

Tab. 3 Transition probability matrices in primary states ($\times 10^{-4}$)

| 侵蚀类型 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | Σ |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|---------------|
| 1 | $\frac{9912}{9882}$ | $\frac{3}{0}$ | $\frac{22}{73}$ | $\frac{55}{45}$ | $\frac{8}{0}$ | $\frac{0}{0}$ | $\frac{0}{0}$ | $\frac{1}{1}$ |
| 2 | $\frac{19}{13}$ | $\frac{9160}{9877}$ | $\frac{122}{297}$ | $\frac{146}{13}$ | $\frac{41}{0}$ | $\frac{4}{0}$ | $\frac{0}{0}$ | $\frac{1}{1}$ |
| 3 | $\frac{121}{22}$ | $\frac{50}{244}$ | $\frac{9701}{9562}$ | $\frac{25}{66}$ | $\frac{9}{0}$ | $\frac{5}{0}$ | $\frac{0}{0}$ | $\frac{1}{1}$ |
| 4 | $\frac{61}{59}$ | $\frac{13}{10}$ | $\frac{27}{528}$ | $\frac{9857}{9393}$ | $\frac{39}{0}$ | $\frac{3}{0}$ | $\frac{0}{0}$ | $\frac{1}{1}$ |
| 5 | $\frac{197}{42}$ | $\frac{5}{27}$ | $\frac{28}{508}$ | $\frac{70}{386}$ | $\frac{9695}{9037}$ | $\frac{5}{0}$ | $\frac{0}{0}$ | $\frac{1}{1}$ |
| 6 | $\frac{0}{0}$ | $\frac{0}{611}$ | $\frac{0}{0}$ | $\frac{0}{389}$ | $\frac{0}{0}$ | $\frac{9792}{9090}$ | $\frac{203}{0}$ | $\frac{1}{1}$ |
| 7 | $\frac{0}{0}$ | $\frac{0}{0}$ | $\frac{0}{0}$ | $\frac{0}{500}$ | $\frac{0}{0}$ | $\frac{0}{0}$ | $\frac{1}{9500}$ | $\frac{1}{1}$ |

4 土壤侵蚀类型演变的定量分析

4.1 各侵蚀类型的增减

根据表 2 中的总和栏, 可得出各侵蚀类型在每一阶段中所占点数的增减情况。由表 4 清楚可见, 岳西县在 1958—1982—1992 年的 30 多年中, 土壤侵蚀呈马鞍型变化。第一阶段中, 由于 10 年动乱等原因, 毁林开荒、滥砍乱伐等现象十分严重, 植被遭到破坏, 导致侵蚀在总体上加重。表现在无明显和轻度侵蚀所占点数急剧减少, 分别减少约 59% 和 32%, 而中度以上侵蚀所占点数则均有增加, 合计增加约 13%, 结合表 1 所得出的年侵蚀量也由 $5.31 \times 10^6 \text{t}$ 增加至 $5.90 \times 10^6 \text{t}$, 增加约 11%, 年侵蚀模数也由 $2.634 \text{t}/\text{km}^2$ 增加至 $3.480 \text{t}/\text{km}^2$, 增加约 32%; 但在第二阶段中, 由于水土保持工作重新得到高度重视, 经过近 10 年的综合治理, 水土流失状况迅速好转, 侵蚀在总体上减轻, 表现在无明显和轻度侵蚀所占点数急剧增加, 前者增加约 32%, 后者增加近 2.6 倍, 而中度以上侵蚀所占点数

表 4 1958—1982—1992 年侵蚀类型增减状况(点)

Tab. 4 Changes of erosion types during 1958—1982—1992 (Point)

| 侵蚀类型 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | Σ |
|-----------|------|------|------|------|------|-----|----|----------|
| 1958—1982 | +270 | -230 | -152 | +10 | +86 | +14 | +2 | 0 |
| 1982—1992 | -22 | +51 | +490 | -248 | -252 | -18 | -1 | 0 |

均大幅度减少, 合计减少约 54%, 侵蚀量也减至 $3.49 \times 10^6 \text{t}$, 减少约 41%, 侵蚀模数也减至 $2\ 027 \text{t}/\text{km}^2$, 减少约 42%。

4.2 侵蚀类型之间相互转化的状况

图 1 是以中度侵蚀类型为代表, 反映其与其它侵蚀类型间在两个阶段中的相互转化状况。同样, 其它侵蚀类型也可得到类似的图解。由这些图解, 可清晰地了解各侵蚀类型在两个阶段中所占点数的“收支”过程, 据此可更客观地评估岳西县历年来的水土保持工作的成效。

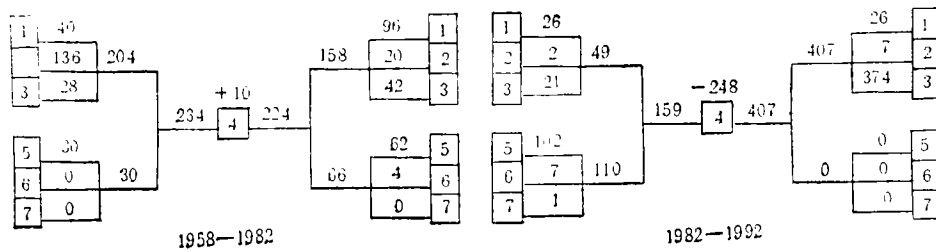


图 1 中度侵蚀类型与其它侵蚀类型之间的相互转化状况

Fig. 1 Transitions between moderate erosion type and other erosion types

根据这些图解, 可定量地分析以往只能定性理解的概念, 如“边治理, 边破坏”等。由图 1 可见, 无论在哪个阶段, 均存在着治理和破坏双重现象, 孰轻孰重则决定着侵蚀在总体上的加重和减轻。在第一阶段中, 原非侵蚀、无明显侵蚀和轻度侵蚀所占点位中约 18% “恶化”为中度侵蚀, 原强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀所占点位中约 16% “好转”为中度侵蚀, 而原中度侵蚀所占点位中约 24% “好转”为非侵蚀、无明显侵蚀和轻度侵蚀, 10% “恶化”为强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀。在第二阶段中, 原非侵蚀、无明显侵蚀和轻度侵蚀所占点位中约 5% “恶化”为中度侵蚀, 原强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀所占点位中约 39% “好转”为中度侵蚀, 而原中度侵蚀所占点位中约 61% “好转”为非侵蚀, 无明显侵蚀和轻度侵蚀, 尚无点位“恶化”为强度以上侵蚀。

由图 1 和类似的图解还可看出侵蚀类型之间相互转化的另一个特点, 即无论是“恶化”还是“好转”的过程, 均是一个循序渐进的过程。也就是说, 相邻或相近的侵蚀类型之间相互转化的比例较大, 而非相邻或相远的侵蚀类型之间相互转化即越级跳跃或转化的比例较小。这也从一个方面说明了水土流失治理需要一个较长的过程才能产生明显的成效。

当然, 上述转化信息如能与地理信息系统以及各类专题图件结合起来, 将更能直观地展现出侵蚀的动态演化与地形、地貌、植被、土地利用方式等自然、环境、社会经济状况因素之间的联系。

5 土壤侵蚀动态演变的模拟和预测

根据马氏过程运算程序, 利用表 3 所列出的初始转移概率矩阵, 可模拟出某一初始年

代(1958年或1982年)之后若干年乃至达到相对稳定状态时各侵蚀类型所占的比例状况,即侵蚀类型格局。

由于1958—1982—1992年的30多年中,岳西县水土流失经历了加重和减轻两个不同阶段,因此,对未来(1992年之后)侵蚀类型格局的预测,显然应采用第二阶段的初始转移概率矩阵。但是,若用第一阶段的初始转移概率矩阵模拟1992年的侵蚀类型格局,并将其与1992年的实际状况相比较(表5),两者之间的显著差异则更能充分地反映出1982—1992年阶段岳西县水土保持工作的成效和意义。由表5可以算出,如果1982—1992年与1958—1982年一样为水土流失加重阶段的话,那么1992年的模拟侵蚀量($5.56 \times 10^6\text{t}$)将为实际侵蚀量($3.49 \times 10^6\text{t}$)的近1.6倍,模拟侵蚀模数($3.38 \times 10^3\text{t}/\text{km}^2$)将为实际侵蚀模数($2.03 \times 10^3\text{t}/\text{km}^2$)的近1.7倍。

表 5 1992 年侵蚀格局模拟值和实测值(%)

Tab. 5 Simulated and measured patterns of erosion type in 1992 (%)

| 侵蚀类型 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | Σ |
|------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|----------|
| 模拟值 | 30.72 | 9.18 | 15.40 | 32.27 | 11.21 | 0.83 | 0.40 | 100 |
| 实测值 | 27.50 | 10.45 | 40.30 | 21.10 | 0.60 | 0 | 0.05 | 100 |
| 差 值 | +3.22 | -1.27 | -24.90 | +11.17 | +10.61 | +0.83 | +0.35 | 0 |

如果第二阶段中水土流失的治理措施和治理强度等因素在今后能得以相对稳定的保持,那么可以应用该阶段初始转移概率矩阵,对岳西县未来的侵蚀格局进行预测。表6列出了若干代表年代岳西县侵蚀类型的格局。

表 6 岳西县土壤侵蚀格局的未来演变趋势预测(%)

Tab. 6 Forecast of soil erosion patterns in future periods in Yuexi (%)

| 侵蚀类型 | 2000 年 | 2010 年 | 2020 年 | 2030 年 | 2040 年 | 2050 年 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1.非侵蚀 | 26.40 | 25.11 | 23.89 | 22.77 | 21.75 | 20.85 |
| 2.无明显 | 15.55 | 19.85 | 23.24 | 25.76 | 27.58 | 28.90 |
| 3.轻度 | 38.31 | 41.16 | 42.06 | 42.30 | 42.38 | 42.45 |
| 4.中度 | 17.27 | 12.81 | 10.25 | 8.80 | 7.98 | 7.52 |
| 5.强度 | 2.30 | 1.00 | 0.53 | 0.36 | 0.30 | 0.28 |
| 6.极强度 | 0.14 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0 | 0 |
| 7.剧烈 | 0.04 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0 |
| 年侵蚀量 ($\times 10^6\text{t}$) | 3.40 | 2.90 | 2.64 | 2.51 | 2.44 | 2.40 |
| 年侵蚀模数 ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) | 1945 | 1631 | 1461 | 1369 | 1313 | 1277 |

由表6可以看出,岳西县土壤侵蚀在未来仍将同1982—1992年阶段一样,呈日趋减轻的趋势,其明显特征为:中度以上侵蚀类型所占比例将日趋减少;无明显侵蚀和轻度侵蚀所占比例将日趋增加;年侵蚀量和侵蚀模数将日趋降低;其平均侵蚀强度将由1992年的中度侵蚀逐步降至轻度侵蚀,但随着时间的推移,其降幅将日趋减少。

由表6还可看出,岳西县未来年侵蚀量(E_a)和年侵蚀模数(E_m)随年份a的变

化均呈指数曲线的趋势,分别满足方程:

$$E_o = 3.7966 \times 10^6 \times Y^{-0.1195}$$

$$E_m = 2.3176 \times 10^3 \times Y^{-0.1536}$$

从表 6 还可看出,即使 2050 年后,仍有约 7% (近 166km²) 的中度以上侵蚀存在,这表明目前对这些类型侵蚀的治理强度仍需适当加大,以尽可能地将中度以上侵蚀减小到最低限度。

6 结语

综上所述,可以得出以下主要结论:

(1) 结合遥感和计算机技术,利用马尔柯夫过程,可定量地分析某一区域内土壤侵蚀的动态演化过程及侵蚀类型之间的相互转化状况,并可了解影响侵蚀类型格局的因子(自然环境变迁,社会经济发展,人为干扰影响等)所起作用的变化状况,从而决定是否调整初始转移概率矩阵,以使模拟和预测结果的可靠性得以保证。

(2) 对岳西县 30 多年来的土壤侵蚀动态演变的研究表明,1958—1982 年为侵蚀日趋加重的阶段,1982 年之后则为侵蚀日趋减轻的阶段。这与实际情况一致,也反映了岳西县近 10 多年来水土保持工作已取得了一定的成效,但仍需持之以恒。

(3) 马氏过程简便、实用,地学含义和定量概念明确,不受比例尺和地域大小的限制,可与地理信息系统结合,也可用于其它资源和环境方面的动态研究。

参 考 文 献

- [1] 徐岚,赵羿. 利用马尔柯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.
- [2] Turner M. G., A spatial simulation model of land use change in a Piedmont County in Georgia. Applied Mathematics and Computation, 1988, 27:39—51.
- [3] 史德明,杨艳生. 土壤侵蚀与土地退化. 中国土地退化防治研究,北京:中国科学技术出版社,1990,179—184.
- [4] 张巨洪等主编. BASIC 语言程序库. 北京:清华大学出版社,1983,351—364.
- [5] 中国科学院地质研究所编著. 数学地质引论. 北京:地质出版社,1977,257—270.
- [6] 肖笃宁. 景观空间结构的指标体系和研究方法. 景观生态学:理论、方法及应用. 北京:中国林业出版社,1991,92—98.
- [7] 周慧珍. 数点法量测土壤制图单元面积的原理及其计算,土壤,1981,13(5): 192—196.

Simulation and Forecast of Soil Erosion Development with Markov Process—A Case Study in Yuexi, Anhui Province

Li Decheng Xu Binbin Shi Xiaori

(Institute of Soil Science, Academia Sinica)

Abstract Based on the soil erosion maps from remote sensing data at 1958—1982—1992 periods, the development of soil erosion and the transitions among soil erosion types in Yuexi of Anhui are quantitatively analysed during those two periods. The transition probability matrices at two primary states (1958 and 1982) are established with Point-Transition-Method. Then, the development and the future tendency of soil erosion and its patterns are simulated and forecasted with Markov process.

Key words Soil erosion, Markov process, Simulation and forecast