

# 基于马尔柯夫模型的红壤退化地 水土流失动态变化预测研究<sup>\*</sup>

石香琼<sup>1,2</sup>, 查 轩<sup>1,2</sup>, 陈世发<sup>1,2</sup>

(1. 福建省亚热带资源与环境重点实验室, 福州 350007; 2. 福建师范大学 地理科学学院, 福州 350007)

**摘 要:** 文章阐述了马尔柯夫模型在水土流失动态变化预测中的应用, 并选取福建省长汀县为研究区, 分别利用长汀县 2000 年和 2007 年的遥感影像图, 在 RS 软件和 GIS 软件支持下, 运用马尔柯夫模型预测了 2014 年该县的水土流失变化情况。研究发现: 在 2007–2014 年, 长汀县的水土流失趋势是流失面积和强度在一定程度上得到控制, 总的水土流失面积缩小, 强度降低, 极强度和剧烈侵蚀不明显, 生态环境得到好转。这一发现说明红壤退化地的水土流失正处在一种变化状态, 预示着未来时期以长汀县为代表的红壤退化地人为干扰仍然是水土流失面积和强度变化的主要方面, 红壤退化地的水土保持任务仍较艰巨。

**关键词:** 马尔柯夫模型; 水土流失; 红壤退化地; RS 和 GIS

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)04-0019-05

## Prediction the Changes of Soil and Water Loss Dynamics of Red Soil Degradation Based on Markov Model

SHI Xiang-qiong<sup>1,2</sup>, ZHA Xuan<sup>1,2</sup>, Chen Shi-fa<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Subtropical Resources and Environment, Fujian Province, Fuzhou 350007, China;

2. College of Geography Science, Fujian Normal University; Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** This paper expounds the application of Markov prediction model to examine the change of soil and water loss dynamics. And in this paper, taking Changting County as the study field in red soil degradation, using the TM image in 2000 and 2007 respectively, with the support of RS and GIS, it obtained the circumstances of changes of soil and water loss in the two periods of time, and predicted the changes of soil and water loss dynamics in 2014 with the Markov prediction model. The result showed the trend of soil and water loss in changting county is, to a certain extent, under control. Furthermore, ecological environment is becoming improved during the period of 2007 to 2014, because the total loss area and intensity were being decreased, serious intensity of loss and acute loss was not obvious. And according to the analysis by using Markov prediction model, it indicated that the soil and water loss was changing. This implied that human activity is the main cause to change. So the soil and water conservation task in red soil degradation was still arduous.

**Key words:** Markov model; soil and water loss; red soil degradation; RS and GIS;

水土流失是红壤退化的主要机制之一<sup>[1]</sup>, 它是土地退化的一个重要原因。在我国南方红壤丘陵区, 由于自然因素及人类的不合理开发利用, 土壤侵蚀退化严重, 水土流失范围广、程度高。长汀县是

我国南方红壤区水土流失最为严重的区域之一, 也是福建省水土流失最为严重的县份之一, 水土流失历史长、面积广、程度重、危害大。严重的水土流失不仅造成生态环境恶化, 旱涝灾害频繁, 人民群众生

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2008-11-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目 (2007CB407207); 国家自然科学基金项目 (40571095); 福建省自然科学基金项目 (D0810008); 福建师范大学地理科学学院研究生科研创新基金

作者简介: 石香琼 (1983-), 女, 山西文水人, 在读硕士, 主要从事水土保持与生态环境等方面研究。E-mail: sxiangqiong@163.com

通信作者: 查轩 (1961-), 男, 陕西咸阳市人, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持生态方面的研究。E-mail: xzha@fjnu.edu.cn

活贫困,是国家级的贫困县,而且也严重影响了汀江下游国家重点工程棉花滩水电站的使用年限<sup>[2]</sup>。自 2000 年省委、省政府把“开展以长汀严重水土流失区为重点的水土流失综合治理”列入为民办实事项目以来,长汀县经过治理,生态环境发生了较大变化。因此,研究探讨这一区域的水土流失面积和强度的动态变化,并进行科学预测,以便能更好地掌握这一区域的水土流失变化规律,有利于当地水土保持工作的开展,同时对该地区的生态环境及社会经济的可持续发展具有重要的意义。

当前,马尔柯夫模型是一种应用较广泛的预测模型。它是俄国数学家 Markov, A. A 于 1907 年用数学方法研究布朗运动过程时发现的一种随机运动规律。A. N. 卡尔曼哥隆等人在 20 世纪 40 年代又发展了这一理论<sup>[3]</sup>。国外早在 1979 年, Hulst<sup>[4]</sup> 等人就应用马尔柯夫模型预测了植被生态的问题。国内从 20 世纪 80 年代开始,阳含熙<sup>[5]</sup>、徐岚<sup>[6]</sup> 等人较早应用马尔柯夫模型预测了森林生态系统的演替以及土地利用格局的变化等。到目前为止,这一理论已在植被、土地、绿洲、湿地、水利、地质、人口、经济学等领域的预测研究中广泛应用,但在水土流失预测方面用的较少<sup>[7-13]</sup>。而水土流失的动态变化又具有马尔柯夫过程的性质。因为马尔柯夫预测方法是根据变量目前的状态去预测未来如何变化,这一预测只需要最近的动态资料,而不需要连续的历史资料,且在一定区域内,水土流失不同侵蚀级别之间相互转化,目前尚难用函数关系表示。因此,水土流失的动态变化满足马尔柯夫预测的特点,此模型可以用于水土流失动态变化预测。

1 研究区概况

长汀县位于福建省西南部,武夷山脉南段的闽赣交界区域,地处 116°00′45″-116°39′20″E 和 25°18′40″-26°02′05″N。东西宽 66 km,南北长 80 km。北邻宁化,南接武平、上杭,东接清流、连城,西与江西赣南交界。全县地形破碎,岭谷相间,属闽西南上古生代覆盖层低山丘陵地貌,气候属湿润的中亚热带季风气候。县内以红壤为主要土壤资源,分布广,面积大,沉积岩红壤主要分布在新桥、大同、策武、南山、涂坊、宣成等乡镇;变质岩红壤主要分布在四都、童坊、铁长和庵杰等乡镇,酸性岩红壤分布在河田、三洲、濯田、红山及南山镇松毛岭等地。长汀水土流失区表层土壤 A 层普遍已经缺失,部分仅留 AB 层,大部分连 AB 层也已缺失,强度流失区甚至连 B 层也已流失<sup>[14]</sup>。县内植被属闽西博平岭山地常绿槲类阔叶林小区、低山

丘陵温和常绿甜槠阔叶林地段。主要植被有马尾松、灌丛及地表草被等次生植被和人工植被。近年来,长汀县虽经过治理,但是水土流失仍然十分严重,生态环境仍然十分脆弱,许多治理成果难以巩固,“一年青、二年黄、三年见阎王”<sup>[14]</sup>。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

研究采用长汀县 2000 年和 2007 年的遥感影像数据,以长汀县 1:5 万地形图为辅助资料。对这两个时相的遥感影像图在 Erdas 软件和 ArcGIS 软件处理下,通过目视判读和屏幕数字化输出 2000 年和 2007 年的长汀县水土流失现状图,然后在 GIS 软件 ArcGIS9.0 的支持下对这两期的水土流失现状图层进行空间叠加分析,从中提取水土流失强度类型的面积变化数据,进而得到水土流失的动态变化数据。此外,根据中华人民共和国行业标准 SL190-96《土壤侵蚀分类分级标准》,水土流失面积是指规定的轻度侵蚀等级以上的水蚀和风蚀面积之和,因此,将长汀县的土壤侵蚀级别分为微度、轻度、中度、强度、极强度和剧烈 6 个级别,分级值分别为 1, 2, 3, 4, 5, 6。

2.2 研究方法

马尔柯夫模型是对一种特殊的随机运动过程预测的模型。这一过程的主要特点是“无后效性”,即每次状态的转移都只与前一时刻的状态有关,而与过去的状态无关。这一适用性能够应用红壤退化地的水土流失动态变化预测。运用马尔柯夫模型预测水土流失的动态变化,关键在于转移概率矩阵 P 的确定,其数学表达式为<sup>[15]</sup>:

$$P = P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} & P_{16} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} & P_{26} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} & P_{36} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} & P_{46} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} & P_{56} \\ P_{61} & P_{62} & P_{63} & P_{64} & P_{65} & P_{66} \end{bmatrix}$$

式中:  $P_{ij}$  ——水土流失强度类型  $i$  到  $j$  的转移概率,满足以下两个基本条件:

- (1)  $0 \leq P_{ij} \leq 1$ , 即各元素为非负值;
- (2)  $\sum_{j=1}^6 P_{ij} = 1$ , 即每行元素之和为 1。

3 水土流失现状及动态变化分析

3.1 水土流失现状分析

长汀县是我国南方红壤退化地水土流失最为严重的县份之一,属国家级水土保持重点治理区。根

据 2000 年和 2007 年水土流失现状图, 得到 2000 年和 2007 年的水土流失状况如表 1 所示。

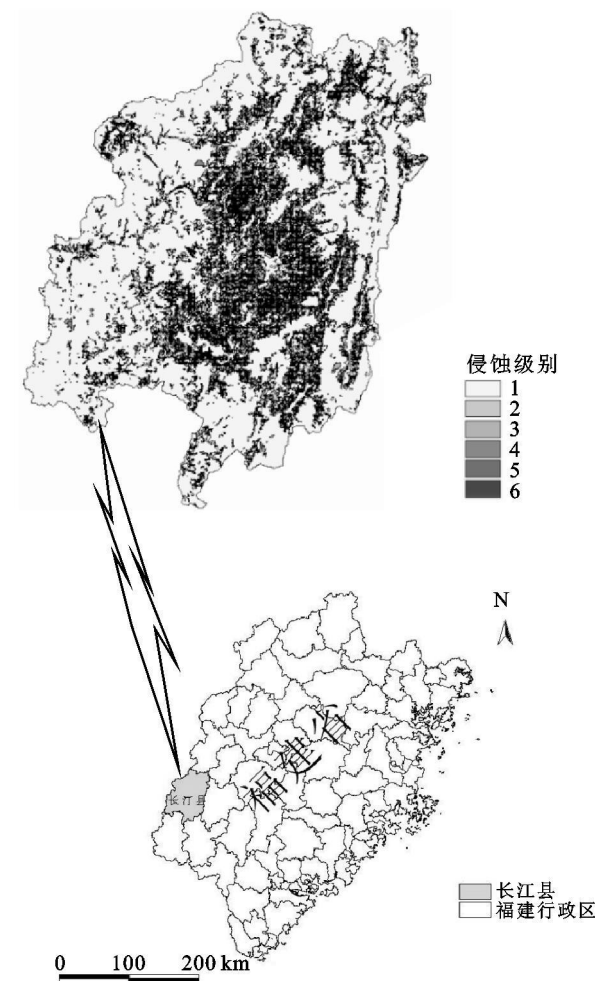


图 1 长汀县水土流失叠加图

表 1 长汀县 2000 年和 2007 年水土流失强度类型面积统计

侵蚀 级别	流失面积/km <sup>2</sup>		占流失总面积/%		占土地面积/%	
	2000 年	2007 年	2000 年	2007 年	2000 年	2007 年
1 微度	2422.26	2655.40	0	0	78.20	85.94
2 轻度	361.82	244.99	53.59	56.38	11.68	7.93
3 中度	120.70	123.58	17.87	28.44	3.90	4.00
4 强度	114.44	54.75	16.95	12.60	3.69	1.77
5 极强度	68.75	9.55	10.18	2.20	2.22	0.31
6 剧烈	9.52	1.63	1.41	0.38	0.31	0.05
合计	3097.49	3089.90	100	100	21.80	14.06

同一时期, 其余 5 种类型均有转化为轻度流失, 转入面积最多的是微度流失, 面积为 105.99 km<sup>2</sup>; 其次是强度流失, 面积是 11.73 km<sup>2</sup>; 最小的是剧烈流失, 仅 1.46 km<sup>2</sup> 转化为轻度流失。因此 2000–2007 年轻度流失面积净减少了 208.94 km<sup>2</sup>。从图像中可以看出, 轻度流失主要分布于汀西的四都、古城、汀北的新桥、馆前等中、低山区以及汀中的策武外围地区、河田东部和北部、濯田东北部以及涂坊西

从表 1 可以看出, 无论是 2000 年还是 2007 年, 长汀县水土流失都以轻度流失为主, 且随着流失级别的增加, 水土流失面积呈下降趋势。2007 年比 2000 年减少 240.73 km<sup>2</sup>。流失比例下降了 7.74%。从 2000–2007 年中度流失面积呈增长趋势, 2007 年比 2000 年增大 10.57%, 说明强度、极强度、剧烈水土流失经过治理, 情况好转而变为中度流失。极强度流失面积减小最大, 2007 年比 2000 年减小 7.98%。但与福建省 2000 年 10.72% 的水土流失面积<sup>[16]</sup>相比, 长汀县 2007 年还有 14.06% 的流失面积存在, 说明长汀县目前的水土流失仍较严重。

3.2 水土流失动态变化分析

在 ArcGIS 9.0 软件支持下, 对长汀县 2000 年和 2007 年的水土流失现状图进行空间叠加分析(如图 1), 得到 2000–2007 年水土流失变化图, 并进行水土流失面积变化统计, 得到 2000 年和 2007 年的水土流失强度类型面积变化表, 见表 2。其中本研究区面积为 3 097.49 km<sup>2</sup>。

3.2.1 轻度流失变化分析 根据水土流失叠加图和表 2, 轻度流失面积在 2000–2007 年期间, 总的趋势是逐年减少。表 2 数据从面积上更具体地显示了轻度流失的转化情况。2000–2007 年轻度流失面积未发生转化的有 106.39 km<sup>2</sup>, 占 2000 年轻度流失总面积的 29.40%。转化成微度流失的面积最多为 279.30 km<sup>2</sup>, 占总转出面积的 80.4%; 其次是中度流失, 面积为 49.55 km<sup>2</sup>; 转化为剧烈流失的面积最小, 仅为 0.45 km<sup>2</sup>, 占总转出面积的 0.12%。

部、南山中部等丘陵地区。

3.2.2 中度流失变化分析 从表 2 可以看出, 2000 年中度流失总面积为 120.70 km<sup>2</sup>, 到 2007 年原有流失中仍然有 11.38 km<sup>2</sup>, 转化为其它流失的总面积为 109.32 km<sup>2</sup>, 主要转化为微度、轻度侵蚀, 转化面积分别为 36.76 km<sup>2</sup> 和 10.49 km<sup>2</sup>。同一时期, 主要由于强度、极强度和剧烈流失经过近几年的治理, 流失情况有所好转, 逐步转化为中度流失。2000

– 2007 年中度流失面积净增加了 58.02 km<sup>2</sup>。由图像得出, 中度流失主要分布于三洲大部分地区、河田中部和西南部、策武中东部、大同东南部以及童坊东部等丘陵区。

表 2 2000– 2007 年水土流失强度类型面积变化

km<sup>2</sup>

侵蚀级别	2007 年					
	1	2	3	4	5	6
1	2230.92	105.99	35.01	16.74	3.71	0.30
2	279.3	106.39	49.55	15.66	2.58	0.45
3	36.76	10.49	11.38	6.11	0.71	0.21
4	49.44	11.73	17.17	10.15	1.56	0.44
5	63.00	9.03	8.89	5.35	0.89	0.22
6	3.45	1.46	1.58	0.75	0.11	0.01
转入面积	431.95	138.60	112.20	44.61	8.67	1.62
转出面积	161.75	347.54	54.18	80.34	86.49	7.35
消长状况	270.20–	208.94	58.02	– 35.73–	77.82	– 5.73

3.2.3 强度及其以上流失变化分析 从表 2 可以看出, 强度、极强度、剧烈流失面积共缩小了 119.28 km<sup>2</sup>, 极强度流失面积减少最大为 77.82 km<sup>2</sup>, 其中河田减小面积最大。强度及其以上流失主要呈斑块状分布于策武、三州、河田、南山、濯田、馆前、涂坊等低山丘陵地区。这些地区大部分以酸性岩红壤为主, 植被破坏较严重, 崩岗分布较多, 以水力侵蚀下的面蚀和沟蚀为主。此外, 赣龙铁路、汀龙高速公路、采矿等的建设开发也使得这些地区的流失强度相对较大。

## 4 基于马尔柯夫模型的预测

### 4.1 确定初始状态矩阵

将水土流失面积按流失强度划分为一系列相互演化的状态, 各状态在系统中所占的份额, 即不同流失强度的水土流失面积占全部流失面积的百分比作为各状态的初始概率。各状态的初始概率构成初始状态矩阵。以 2000 年长汀县水土流失现状图获得的不同流失强度的面积作为初始状态矩阵, 记为  $A^0$  (见表 3)。

表 3 初始状态矩阵

%

侵蚀级别	1	2	3	4	5	6
$A^0$	0	53.59	17.87	16.95	10.18	1.41

### 4.2 确定转移概率矩阵

运用马尔柯夫模型对水土流失的动态变化进行预测, 关键在于转移概率矩阵  $P$  的确定。利用表 2 中

水土流失面积的变化计算出各流失强度的平均转化率从而得到转移概率。例如 2000 年的轻度水土流失到 2007 年部分转化为中度、强度、极强度和剧烈流失, 后者占 2000 年轻度流失面积的平均百分比再除以  $n=7$  得到年平均转移概率。依此类推, 得到初始状态( $n=0$ )的转移概率矩阵, 见表 4。然后根据初始状态矩阵, 经过  $n=7$  步转移到 2007 年, 得到 2000–2007 年流失强度类型的转移概率矩阵, 见表 5。

表 4 初始状态的水土流失强度类型转移概率矩阵( $n=0$ )

$K$	$K+1$					
	1	2	3	4	5	6
1	0.9347	0.0438	0.0130	0.0069	0.0015	0.0001
2	0.5174	0.2941	0.1369	0.0433	0.0071	0.0012
3	0.7606	0.0869	0.0943	0.0506	0.0059	0.0017
4	0.6413	0.1025	0.1501	0.0887	0.0136	0.0038
5	0.6455	0.1313	0.1293	0.0778	0.0129	0.0032
6	0.5890	0.1534	0.1661	0.0788	0.0116	0.0011

注:  $K$ ——土壤侵蚀级别。

表 5 长汀县 2000– 2007 年水土流失强度类型转移概率矩阵( $n=7$ )

	1	2	3	4	5	6
1	0.90103	0.06098	0.02436	0.01127	0.00211	0.00025
2	0.90063	0.06116	0.02450	0.01133	0.00212	0.00026
3	0.90091	0.06103	0.02440	0.01129	0.00211	0.00026
4	0.90082	0.06107	0.02443	0.01130	0.00212	0.00026
5	0.90081	0.06108	0.02443	0.01130	0.00212	0.00026
6	0.90077	0.06109	0.02445	0.01131	0.00212	0.00026

### 4.3 水土流失动态变化预测分析

以 2007 年不同侵蚀级别的水土流失面积作为初始向量, 以长汀县 2000– 2007 年水土流失强度类型转移概率矩阵为初始状态转移概率矩阵, 以 7 a 为一步长, 预测得出 2014 年的水土流失变化情况。见表 6。

表 6 基于 Markov 的水土流失动态变化预测值

km<sup>2</sup>

侵蚀级别	2000 年	2007 年		2014 年	
		2000 年比较		2007 年比较	
微度	2422.26	2655.40	233.14	2783.95	128.55
轻度	361.82	244.99	– 116.83	188.47	– 56.52
中度	120.70	123.58	2.88	75.33	– 48.25
强度	114.44	54.75	– 59.69	34.86	– 19.89
极强度	68.75	9.55	– 59.20	6.53	– 3.02
剧烈	9.52	1.63	– 7.89	0.76	– 0.87

从表 6 的预测值中, 可以看出 2007– 2014 年间, 各强度流失面积呈下降趋势, 微度侵蚀逐年增

加,但增加的数量在逐渐减少,这符合水土流失治理的实际情况。到 2014 年,长汀县水土流失总面积为  $305.95 \text{ km}^2$ ,比 2007 年减少了  $128.55 \text{ km}^2$ ,占 2000 年水土流失面积的 45.31%。可见,经过全县多年的努力,长汀县的水土流失治理将会有明显的成效。到 2014 年,剧烈和极强度侵蚀已不明显,但轻度、中度、强度侵蚀仍占有较大的面积,大约占到长汀县土地总面积的 1/10,与福建全省 2000 年 10.72% 的水土流失比例相当。说明长汀县的水土流失趋势是流失面积和强度在一定程度上得到控制,面积减小,强度下降,生态环境得到好转。

## 5 结 论

根据水土流失强度类型的面积转化速率所确定的转移概率,用马尔柯夫模型预测的红壤退化地的水土流失动态变化结果与长汀县实际情况基本吻合,表明马尔柯夫模型预测方法的可行性,它具有一定的有效性和适用性。从预测结果看,长汀县水土流失趋势是流失面积和强度在一定程度上得到控制,生态环境得到好转。说明以长汀县为代表的红壤退化地的不同侵蚀级别的水土流失正处在一种变化状态,水土流失总体有所改善,流失面积下降幅度较大,流失级别降低,但局部地区的流失仍较严重,甚至有些地方产生了新的水土流失,这主要由在建的一些高速公路、部分山区公路的建设及一些水利工程建设、采矿、砖瓦窑和陶瓷厂等的人类活动所致。它预示着未来时期以长汀县为代表的红壤退化地的人为干扰仍然是水土流失面积变化的主要方面,水土保持任务仍较艰巨。

通过马尔柯夫模型对水土流失侵蚀级别的动态变化分析,可以为红壤退化地的生态环境治理规划和防治提供有力工具,同时为政府宏观决策提供科学依据。长汀县在未来时期内,要以低山丘陵人口密集区为重点、以小流域为单位、以开发性治理及植被恢复为手段、以水土保持为目标,按照当地自然经济条件,进行全面统一规划,以生物措施与工程措施相结合、治理与开发利用相结合的原则,实行山、水、

林、田、路的综合治理,形成遏制水土流失的合力,从而达到经济效益、生态效益和社会效益的统一。

### 参考文献:

- [1] 张桃林,鲁如坤,季国亮. 中国红壤退化机制与防治[M]. 北京: 中国农业出版社,1999.
- [2] 杨学震,钟炳林,谢小东,等. 丘陵红壤的土壤侵蚀与治理[M]. 北京: 中国农业出版社,2005.
- [3] 沙晋明,李小梅,杨武年,等. 利用马尔可夫模型预测福州市植被动态变化[J]. 水土保持通报,2004,24(5): 5.
- [4] Hulst R. On the dynamics of vegetation: Markov chains as models of succession[J]. Vegetation, 1979, 40: 3-14.
- [5] 阳含熙,潘愉德,伍业钢. 长白山阔叶红松林马氏链模型[J]. 生态学报,1988,8(3): 211-219.
- [6] 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[J]. 应用生态学报,1993,4(3): 272-277.
- [7] 张君,刘丽. 基于马尔可夫模型的绿洲土地利用变化预测研究[J]. 统计与信息论坛,2006,21(4): 73-76.
- [8] 王学雷,吴宜进. 马尔柯夫模型在四湖地区湿地景观变化研究中的应用[J]. 华中农业大学学报,2002,21(3): 288-291.
- [9] 郭笃发. 利用马尔科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[J]. 土壤,2006,38(1): 42-47.
- [10] 宋巧娜,唐德善. 基于灰色马尔可夫模型的农业用水量预测[J]. 安徽农业科学,2007,35(6): 1788-1789.
- [11] 梁盛泉. 甘肃省各地市人均 GDP 的马尔可夫预测及变动分析[J]. 中国农业资源与区划,2007,28(2): 38-41.
- [12] 解蕾,袁春,周伟. 山西省汾河水库上游水土流失动态监测与分析[J]. 资源开发与市场,2008,24(7): 598-600.
- [13] 丁超. 基于马尔科夫的商业企业营销分析[J]. 商场现代化,2007,(29): 22-23.
- [14] 曾从盛,郑达贤. 福建典型区生态环境研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社,2005: 8-26.
- [15] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社,2002: 93-98.
- [16] 王维明,陈明华,林敬兰,等. 长汀县水土流失动态变化及防治对策研究[J]. 水土保持通报,2005,25(4): 73-77.