

# 太行山低山丘陵区不同地表类型降雨入渗产流规律研究<sup>\*</sup>

肖登攀<sup>1,2</sup>, 韩淑敏<sup>1</sup>, 杨艳敏<sup>1</sup>, 马林<sup>1,2</sup>, 侯永平<sup>1,2</sup>

(1. 河北省节水农业重点实验室/中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄 050021;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**通过人工降雨来研究太行山低山丘陵区典型地表类型下的降雨入渗产流规律。结果表明:(1)不同地表类型,地表产流特征不同。主要表现在:降低坡度主要推迟产流开始时间,而植被能够推迟整个径流过程;增加植被覆盖度和降低坡度能够明显降低产流量,延缓产流时间、降低径流速率;不同地表类型的地表径流速度与径流稳定前降雨历时具有明显的对数函数关系。在以 0.64 mm/min 左右的降水强度持续 80 min 后,斜坡径流小区不同地表类型径流系数大小顺序为:斜坡裸地>没有枯枝落叶的斜坡灌木>斜坡草地>有枯枝落叶的斜坡灌木。与裸地相比,后面 3 种地表类型的地表径流量分别减少了 33.7%(8.3 mm), 49.2%(12.1 mm)和 75.2%(18.5 mm)。(2)不同植被、枯枝落叶在降低地表产流量的同时也增加了深层土壤中的入渗量。斜坡裸地地下渗到 20 cm 以下的水量仅为降雨的 6.0%,明显小于有植被条件下的 23.3%~32.5%。灌木下的枯枝落叶能够增加土壤入渗量 20%左右,土层 20 cm 以下入渗量增加 8%。

**关键词:**地表径流; 人工降雨; 降雨分配; 植被类型

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2009)05-0035-05

## Study on Rainfall - Infiltration - Runoff Under Typical Ground Surfaces Conditions in the Hilly Regions of Taihang Mountain

XIAO Deng-pan<sup>1,2</sup>, HAN Shu-min<sup>1</sup>, YANG Yan-min<sup>1</sup>, MA Lin<sup>1,2</sup>, HOU Yong-ping<sup>1,2</sup>

(1. Hebei Key Laboratory of Water-saving Agriculture, Center for Agriculture Resource Research, Institute of Genetic and Development Biology, CAS, Shijiazhuang 050021, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100045, China)

**Abstract:** An artificial rainfall experiment was conducted to clarify the characteristics of rainfall - infiltration - runoff under typical ground surfaces conditions in the hilly regions of Taihang Mountain. The results showed that: (1) Characteristics of runoff generation was apparently different for various ground surfaces, which was mainly demonstrated by following results: decreasing slope gradient delayed the time of runoff generation, while vegetation actually postponed the whole runoff process. Increasing vegetation cover and reducing slope gradient significantly reduced runoff volume and rate, and also delayed runoff generation. Under every special ground surface, the rate of surface runoff is logarithmically related with rainfall duration from runoff commencing to stabilization. After an artificial precipitation with an intensity of 0.64 mm/min and a duration of 80 minutes, the order of runoff coefficient for different land covers of slope was: bare land > shrubs without a litter layer > grassland > shrubs with a litter layer. Compared with bare land, the later three ground surfaces reduced runoff by 33.7% (8.3 mm), 49.2% (12.1 mm) and 75.2% (18.5 mm) respectively. (2) As different land cover and surface litter combinations reduced runoff amount, actually promoted more rainwater infiltrating to the deeper soil layer. Only 6.0% of rainfall infiltrated to the soil below 20 cm depth in bare land, which was significantly less than 23.3%~32.5% of rainfall in vegeta-

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2009-04-29

基金项目: 林业科技支撑计划(2006BAD03A02); 国家科技支撑计划(2007BAD69B03)

作者简介: 肖登攀(1982-), 男, 河北张北人, 硕士研究生, 主要从事坡地水文学、地表水循环及影响研究。E-mail: xiaodp@sjziam.ac.cn

ted conditions. The litter layer underlying shrubs increased 20 % of rainwater infiltrated to soil and 8 % to the soil below 20 cm depth.

**Key words** :surface runoff ; artificial rainfall ; rainfall distribution ; vegetation types

地表径流是土壤侵蚀、面源污染以及养分流失的动力<sup>[1-3]</sup>,也是集雨灌溉的主要水源<sup>[4]</sup>。研究者们对地表径流的形成机制和影响因素进行了大量的研究<sup>[5-7]</sup>,研究表明不同的地表类型及坡度,径流产生的时间和大小不同<sup>[3,8]</sup>。地表径流主要来源于降雨,由于天然降雨的复杂多变性,人为难以预控,因而在短时间内不可能进行多次观测试验,积累各种资料。因此,近年来国内外研究者多采用人工降雨模拟装置进行地表径流和土壤侵蚀的研究<sup>[9-13]</sup>。太行山低山丘陵区不同地表类型降雨入渗产流规律研究较少,通过选取该区典型的植被类型和两个不同的坡度类型建立径流小区,用人工降雨模拟自然降雨来研究地表产流规律,同时监测降雨前后土壤不同深度的体积含水量,来分析不同土壤深度的降雨入渗量。其结果对太行山低山丘陵区防治水土流失,提高集雨灌溉集水量有重要意义,进而为保护,改良和合理利用山丘区的林草资源,维护和提高土地生产力提供科学的理论依据和实践指导。

1 研究区概况

试验区位于河北元氏县中国科学院太行山山地生态试验站。属于干旱半干旱大陆性季风气候,雨热同季,春冬季干旱少雨雪,夏季炎热多雨。年均降水量 548.9 mm,雨季(6 - 9 月)平均降雨量 392.4 mm,占全年降雨量的 71.5 %,年均蒸发量 1 598.5 mm,日照时数 2 038 h,太阳总辐射 116 ~ 136 kJ/cm<sup>2</sup>。

研究区内土壤种类主要为花岗片麻岩(部分地带为石灰岩和页岩)母质上发育的山地褐土,土壤结构不良,石砾含量大,且多属粗骨土,易侵蚀。土层浅薄,土层厚度为 20 ~ 50 cm,阴坡少量砂土深度可达 70 cm 左右,阳坡土层厚度 20 cm 左右,平均土层厚度 34.1 cm,土壤常年较干旱,春季和初夏土壤含水量多在 10 % 以下。阴阳坡植被差别较大,阳坡主要以盖度较低的荆条、酸枣为主,阴坡植被以黄背草、白羊草为主,盖度较高。

2 试验布设与方法

试验观测期间(2008 年 10 月 9 日 - 10 月 15 日),依据研究区的典型植被类型,设置不同植被类型和不同坡面(斜坡和平坡)的径流小区 6 个,每个径流小区基本特征见表 1。

表 1 试验径流小区基本特征

径流 小区	坡度/ (°)	坡向	坡长/ m	小区面 积/m <sup>2</sup>	地表植被类型
X1	18	南西	3	6	裸地
X2	21	南西	3	6	黄背草、白羊草
X3	18	南	3	6	荆条、酸枣,无枯枝落叶
X4	18	南	3	6	荆条、酸枣,有枯枝落叶
P5	0	南	2	4	裸地
P6	0	南	2	4	荆条、酸枣,无枯枝落叶

分别在每个径流小区进行模拟降雨试验,实验降雨装置采用单喷头降雨器,降雨强度可通过调整供水压力和喷头个数来实现,本试验采用喷头间隔距离 0.5 m,喷头高度为 1 m,均匀系数 80 % 以上,降雨强度保持在 0.64 mm/min 左右,降雨历时 80 min。降雨前在试验小区地表均匀放置 8 个塑料小桶,降雨结束后用专用雨量筒量取收集到的降雨,所测降雨是降到地面的雨量,排除了植被灌层截流的影响。用带刻度的量杯量取不同时间段 1 min 内的径流量,计算该时间段的径流速率。用大塑料桶收集径流,径流结束后用量筒量取径流量。试验过程中记录地表径流开始产生时间及降雨结束后径流延迟时间。

降雨前后用便携式时域反射仪(Field Scout TM TDR)测定 0 - 10 cm 和 0 - 20 cm 深度的土壤体积含水量,测量分辨率 0.1 %,精度为 ±3.0 %。通过公式(1)计算 0 - 10 cm 和 0 - 20 cm 深度土壤储水变化量,10 - 20 cm 深度土壤储水变化量为二者之差。

$$S = C \cdot h$$
 (1)

式中:  $S$  ——土壤储水变化量(mm);  $C$  ——降雨前后土壤体积含水量变化值;  $h$  ——土壤厚度(mm)。

由式(2)计算入渗到土壤 20 cm 以下的水量。

$$W = P - R - S$$
 (2)

式中:  $W$  ——下渗到土壤 20 cm 以下的水量;  $P$  ——降雨量;  $R$  ——径流量;  $S$  ——0 - 20 cm 深度土壤储水变化量。

3 研究结果与分析

3.1 不同地表类型的产流特征

不同地表类型小区降雨、产流特征见表 2。从表中可以看出:

(1) 不同地表类型,产流开始及延迟时间不同,

坡度降低主要推迟产流开始时间,而植被能够推迟整个径流过程,在以 0.64 mm/min 左右的降水强度持续 80 min 后,降雨 2.5 min 后斜坡裸地最先开始产流,斜坡灌木 X3 和斜坡草地 X2 分别在 6.5 min 和 7 min 开始产生径流。地表有枯枝落叶的斜坡灌木小区 X4 比没有枯枝落叶的斜坡灌木小区 X3 产流延迟了 10 min,说明地表植被和枯枝落叶都能有效地推迟径流产生。相似地表类型,平坡径流小区(P5,P6)开始产流的时间明显比斜坡径流小区(X1,X3)晚,灌木在平坡能够推迟 9 min 产生产流(P6-P5),而在斜坡仅能推迟 4.5 min(X3-X1),说明坡度和植被是影响产流特征的两个主要因素。

表 2 不同地表类型小区降雨、产流特征统计表

径流 小区	降雨量/ mm	降雨历时/ min	降雨强度/ (mm·min <sup>-1</sup> )	开始产流 时间/min	径流延迟 时间/min	径流量/ mm	径流系数/ %
X1	50.0	80	0.63	2.5	3.0	24.6	0.49
X2	52.0	80	0.65	6.5	8.0	12.5	0.24
X3	51.0	80	0.64	7.0	6.0	16.3	0.32
X4	50.5	80	0.63	17.0	12.0	6.1	0.12
P5	51.0	80	0.64	17.0	0.5	8.0	0.16
P6	50.0	80	0.63	26.0	1.0	4.0	0.08

(2) 不同地表类型,产流量不同,增加植被覆盖度和降低坡度能够明显降低产流量。

不同的径流小区最终的径流系数差异明显(见表 2),相似地表类型,斜坡径流小区产流量远远大于平坡径流小区。斜坡径流小区径流系数的大小顺序及对应值分别是:斜坡裸地(0.49)>没有枯枝落叶的斜坡灌木小区(0.32)>斜坡草地(0.24)>有枯枝落叶的斜坡灌木小区(0.12)。与裸地相比,种植草地能够减少地表径流量 49.2%(12.1 mm),仅种植灌木能够减少地表径流量 33.7%(8.3 mm),而地面带有枯枝落叶的灌木能够减少地表径流量高达 75.2%(18.5 mm)。表明增加植被覆盖度在减小地表径流量,增加土壤入渗方面的重要作用。这是由于植被根系的穿插作用,改善了土壤结构,土壤容重降低,土壤孔隙度增加,使得土壤透水性和通气性增强。X4 与 X3 相比,枯枝落叶在地表径流减少中的作用占 41.5%(10.2 mm),超出了仅灌木的作用。降低坡度后,裸地(X1 与 P5)能够降低 67.5%(16.6 mm)的径流量,而有灌木时(X3 与 P6)能够降低 75.5%(12.3 mm)的径流量。在平坡上种植灌木(P5 与 P6),径流量能够降低 50%左右,大于在斜坡上的作用(X1 与 X3),同样说明坡度和植被是影响产流特征的两个主要因素。

(3) 不同地表类型,产流过程不同,增加植被覆

盖度能够明显延缓产流时间、降低径流速率。降雨结束后,斜坡裸地随着降雨结束径流速率迅速降低,3 min 后径流停止;斜坡草地和地表无枯枝落叶的斜坡灌木小区径流延迟时间比斜坡裸地长,分别为 8 min 和 6 min,斜坡草地比斜坡灌木持续时间多 2 min。说明有植被的径流小区与裸地相比,能够减缓地表径流的产生,且草地的作用比灌木更明显。对于有枯枝落叶的斜坡灌木小区,降雨结束后,径流持续时间明显长于其他径流小区,降雨结束 12 min 后径流才停止,表明了下垫面枯枝落叶的覆盖对径流有着很好的调节作用。对于平坡径流小区,不论是平坡裸地还是平坡灌木,在降雨结束后,径流延迟时间很短,1 min 内径流停止。

盖度能够明显延缓产流时间、降低径流速率。

平坡径流小区,地表径流产流量较小,从产流开始,径流速率就比较稳定,并且产流历时短,所以仅讨论 4 个斜坡径流小区的地表径流速率随降雨的变化过程(图 1)。从图中可以看出,不同地表类型对产流开始时间的影响大于对产流延迟时间的影响,对整个产流历时影响不大,但对径流速率的影响很明显。斜坡裸地(X1)从产流开始,径流速率增长最快,15 min 后即达到稳定,且稳定后径流速率达到雨强的 1/2,为 0.32 mm/min。斜坡草地(X2)和地表仅灌木(X3)时在降雨 40 min 后径流稳定,径流速率分别为 0.17 mm/min 和 0.22 mm/min,斜坡灌木小区是斜坡草地的 1.3 倍。而地表有枯枝落叶的斜坡灌木小区在降雨 50 min 后径流才稳定,稳定后的径流为 0.08 mm/min,是地表无枯枝落叶斜坡灌木小区的 36%。说明增加植被覆盖度后明显延缓了产流开始和稳定的时间,降低了径流速率。

(4) 不同地表类型的地表径流速度与径流稳定前降雨历时具有明显的对数函数关系。

对产流降雨历时和地表径流速率的统计分析结果表明,4 个斜坡径流小区的地表径流速率与从降雨产生径流开始到径流稳定前的降雨历时有很好的对数函数关系,相关系数都达到显著水平,这与苏子友等<sup>[14]</sup>得到的结论一致。也就是说从开始产流后,

地表径流速率以对数的形式增长,直到达到稳定速率;相关回归方程与相关系数见(表 3)。

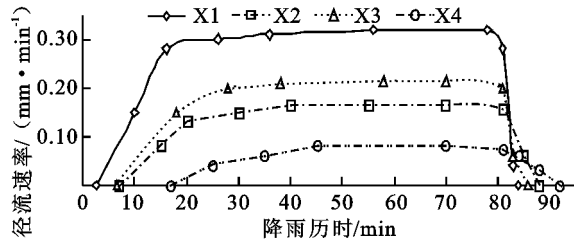


图 1 不同地表类型地表径流速率动态变化  
表 3 地表径流速率变化与产流降雨时间( $t$ )的  
相关性分析及回归方程

径流小区	回归方程	$R^2$
X1	$y = 0.1244 \ln t - 0.1112$	0.9515
X2	$y = 0.0975 \ln t - 0.1824$	0.9654
X3	$y = 0.1241 \ln t - 0.2241$	0.9746
X4	$y = 0.0803 \ln t - 0.2244$	0.9864

3.2 降雨入渗规律

已有研究表明<sup>[15]</sup>,太行山区花岗片麻岩坡面土壤具有较强的透水性,在岩土交界面以上的土层中,降雨再分配以垂直入渗为主,因此,本研究没有考虑壤中流。通过测定降雨前后 0 - 10 cm 和 0 - 20 cm 深度的土壤体积含水量,可以计算不同深度土层的储水量,来分析降雨入渗规律。不同地表类型的径流小区,除地表径流存在明显差异外,不同深度土层的

储水变化量也明显不同(表 4)。从表中可以看出:

不同地表类型增加土壤入渗程度不同。由于不同地表植被减少了地表径流,因此相对增加了土壤入渗量。降低坡度和增加植被覆盖度后,土壤入渗能力相对增强。而不同植被、枯枝落叶在降低地表产流量的同时尤其增加了深层土壤中的入渗量。斜坡裸地下渗到 20 cm 以下的水量仅是降雨量的 6.0%,明显小于有植被时的 23.3% ~ 32.5%。这不仅与裸地地表径流大有关,还因为裸地土壤与有植被的土壤相比,土壤孔隙度较小,尤其缺少大孔隙,从而裸地小区入渗主要是活塞式入渗,而有植被的土壤,尤其是灌木土壤,由于根系的生长,使得土壤有相对较多的大孔隙,这使得有相当一部分水通过优先流的形式入渗到土壤深层。另外,通过比较灌木径流小区和草地径流小区发现,虽然灌木径流小区地表径流系数明显高于草地径流小区,但是灌木径流小区入渗到 20 cm 以下的水量与草地相当,这也充分证明了深根系植被由于根系相对发达且扎根较深,更有利于降水入渗到深层。另外,由于枯枝落叶保水功能,地表有枯枝落叶的灌木小区,有高达 87.9% 的水量入渗到土壤当中,仅枯枝落叶就能够增加土壤入渗量 19.9%,土层 20 cm 以下入渗量增加 8.6%。

表 4 降雨在地表径流及不同深度土层中的分配

径流小区	降雨量/ mm	径流量/ mm	0 - 10 cm 储水 变化量/mm	10 - 20 cm 储水 变化量/mm	> 20 cm 入渗量/ mm
X1	50.0	24.6(49.2%)	12.0(24.0%)	10.4(20.8%)	3.0(6.0%)
X2	52.0	12.5(24.0%)	15.2(29.2%)	12.2(23.5%)	12.1(23.3%)
X3	51.0	16.3(32.0%)	14.6(28.6%)	7.9(15.5%)	12.2(23.9%)
X4	50.5	6.1(12.1%)	16.0(31.7%)	12.0(23.8%)	16.4(32.5%)
P5	51.0	8.0(15.7%)	17.3(33.9%)	13.9(27.3%)	11.8(23.1%)
P6	50.0	4.0(8.0%)	16.2(32.4%)	13.7(27.4%)	16.1(32.2%)

注:括号内百分数表示各个量与降雨量的比值。

4 结论

(1) 坡度和植被是影响产流特征的两个主要因素。不同地表类型,产流特征明显不同。降低坡度主要推迟产流开始时间,而植被能够推迟整个径流过程;增加植被覆盖度和降低坡度能够明显降低产流量,延缓产流时间、降低径流速率;在以 0.64 mm/min 左右的降水强度持续 80 min 后,与裸地相比,种植草地能够减少地表径流量 49.2% (12.1 mm),仅种植灌木能够减少地表径流量 33.7% (8.3 mm),而地面带有枯枝落叶的灌木能够减少地表径流量高达 75.2% (18.5 mm)。枯枝落叶在地表径

流减少中的作用占 62.6%,超出了灌木的作用。另外,不同地表类型的地表径流速度与径流稳定前降雨历时具有明显的对数函数关系。

(2) 不同地表类型增加土壤入渗程度不同。由于不同地表类型减少了地表径流,因此相对增加了土壤入渗量。降低坡度和增加植被覆盖度后,土壤入渗能力相对增强。而不同植被、枯枝落叶在降低地表产流量的同时尤其增加了深层土壤中的入渗量。斜坡裸地下渗到 20 cm 以下的水量仅是降雨量的 6%,明显小于有植被时的 23.3% ~ 32.5%。枯枝落叶能够增加土壤入渗量 20% 左右,增加 20 cm 以下入渗量 8.6%。深根系植被由于根系相对发达

且扎根较深,更有利于降水入渗到深层。

(3) 平坡的地表径流量远远小于斜坡,所以在丘陵区坡面处理上建议在不同高度人为把斜坡修整为平坡,这样平坡不仅可以收集上方斜坡的来水,减少雨水径流损失,同时减轻土壤侵蚀。枯枝落叶具有很好的蓄水保水作用,建议不要人为破坏灌木植被地表的枯枝落叶层,使其发挥原有的生态功能。

参考文献:

[1] 魏强,张秋良.地表径流与土壤侵蚀研究进展[J].中国水土保持,2008(9):30-33.  
[2] 李恒鹏,黄文钰,杨桂山,等.太湖上游典型城镇地表径流面源污染特征[J].农业环境科学学报,2006,25(6):1598-1602.  
[3] 黄河仙,谢小立,王凯荣,等.不同覆被下红壤坡地地表径流及其养分流失特征[J].生态环境,2008,17(4):1645-1649.  
[4] 杨国强,何俊仁.集雨灌溉工程技术研究与应用[J].人民黄河,1997(6):27-28.  
[5] 陈建锋,杨晓俊.降雨径流的机制分析[J].地下水,2007,29(1):3-4.  
[6] Arnaez J, Lasanta T, Ruiz - Flano P, et al. Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards [J]. Soil & Tillage Reserch, 2007,93(2):324-334.  
[7] 杨晓俊.降雨产流影响因素分析[J].地下水,2007,29(5):50-51.

[8] 魏强,张秋良,代海燕,等.大青山不同植被下的地表径流和土壤侵蚀[J].北京林业大学学报,2008,30(5):111-117.  
[9] Vahabi J, Mahdian M H. Rainfall simulation for the study of the effects of efficient factors on run-off rate [J]. Current Science, 2008,95(10):1439-1445.  
[10] Chen H S, Shao M G, LI Y Y. The characteristics of soil water cycle and water balance on steep grassland under natural and simulated rainfall conditions in the Loess Plateau of China [J]. Journal of Hydrology, 2008,360(14):242-251.  
[11] Poulenard J, Podwojewski P, Janeau J L, et al. Run-off and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Paramo: effect of tillage and burning[J]. Catena, 2001,45(3):185-207.  
[12] Linse S J, Mergen D E, Smith J L, et al. Upland erosion under a simulated most damaging storm [J]. Journal of Range Management, 2001,54(4):356-361.  
[13] 唐涛,郝明德,单凤霞.人工降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应研究[J].水土保持研究,2007,14(4):1-3.  
[14] 苏子友,吴文良,张劲松,等.小浪底库区坡地不同利用方式入渗规律与产流产沙特征研究[J].土壤通报,2007,38(2):318-324.  
[15] 曹建生,张万军,刘昌明,等.太行山区坡地暂时饱和区形成机理及渗流补给特性[J].农业工程学报,2007,23(5):14-20.

(上接第 34 页)

参考文献:

[1] Sack R D. Geography, geometry and explanation[J]. Annals of the Association of American Geographers, 1972,62:61-78.  
[2] 蔡运龙,陆大道,周一星,等.中国地理科学的国家需求与发展战略[J].地理学报,2004,59(6):811-819.  
[3] 龙花楼,刘彦随,唐国平,等.昆山市土地利用变化与新农村建设[J].北京大学学报:自然科学版,2007,43(6):790-796.  
[4] Wu L X, Sun B, Zhou S L, et al. A new fusion technique of remote sensing images for land Use/Cover [J]. Pedosphere, 2004,14(2):187-194.  
[5] 李秀彬.全球环境变化研究的核心领域:土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J].地理学报,1996,51(5):523-557.  
[6] 朱晓华,蔡运龙.中国土地利用空间分形结构及其机制[J].地理科学,2005,25(6):671-677.  
[7] 沙晋明,李小明,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):5-9.  
[8] 严伟,钱育渝.马尔柯夫预测在房地产市场营销中的应

用研究[J].重庆建筑大学学报,2004,26(2):110-115.  
[9] 巴剑波,方旭东,徐雄利.马尔可夫链在海军疟疾疫情预测中的应用[J].解放军预防医学杂志,2002,19(2):114-226.  
[10] 张汉雄.用马尔可夫链模型预测宁南山区旱情[J].自然灾害学报,1994,3(1):47-54.  
[11] Buchholz P. Structure analysis approaches for large Markov chains [J]. Applied Numerical Mathematics, 1999,31(4):375-404.  
[12] 郑文瑞,王新代,纪昆,等.非确定数学方法在水污染状况风险评价中的应用[J].吉林大学学报:地球科学版,2003,33(1):59-62.  
[13] 赵小汎,陈文波,代力民. Markov 和灰色模型在土地利用预测中的应用[J].水土保持研究,2007,14(2):19-21.  
[14] 王佑汉,何毓成,赵宏达,等.利用马尔柯夫模型预测成都平原土地利用格局变化:以成都市龙泉驿区为例[J].安徽农业科学,2007,35(15):4580-4582.  
[15] 盛聚,谢式干.概率论与数理统计[M].北京:高等教育出版社,2001:316-324.