

# 黄土高原泾河流域气候和土地利用变化对径流产沙的影响

郑培龙<sup>1</sup>, 李云霞<sup>2</sup>, 赵阳<sup>3</sup>, 张晓明<sup>3</sup>, 寇馨月<sup>4</sup>, 徐晓梧<sup>4</sup>

(1. 北京水保生态工程咨询有限公司, 北京 100053; 2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 北京 300222; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 4. 北京林业大学, 北京 100083)

**摘 要:**研究黄土高原流域水沙对气候和土地利用变化的响应机理,对生态调控决策制定及区域水土保持措施优化配置具有重要意义。以黄土高原泾河流域为研究对象,采用 Mann-Kendall 检验、累积距平和双累积曲线等方法,定量分析了流域近 40 年降水、径流和输沙的演变规律及土地利用变化特征,探讨了流域气候和土地利用变化对流域水沙量的影响。结果表明:(1) 泾河流域径流深和输沙模数年际均呈显著下降趋势,在 20 世纪 80、90 年代尤为明显;(2) 泾河流域土地利用结构发生了重大变化,具体表现为坡耕地向梯田的转换、耕地向林地草地的转换和沙地裸地向草地灌丛的转换;(3) 人类活动影响下的土地利用变化对径流泥沙贡献率分别为 82.90%,94.10%,气候因素影响很小。

**关键词:**径流泥沙;土地利用变化;突变;泾河流域

中图分类号:S157; P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)05-0020-05

## Effects of Climate Variation and Land Use Change on Runoff in Jinghe Basin of the Loess Plateau

ZHENG Peilong<sup>1</sup>, LI Yunxia<sup>2</sup>, ZHAO Yang<sup>3</sup>, ZHANG Xiaoming<sup>3</sup>, KOU Xinyue<sup>4</sup>, XU Xiaowu<sup>4</sup>

(1. Beijing Water Conservation Ecological Engineering Consulting Co., Ltd., Beijing 100053, China; 2. Northern Investigation of China Water Resources, Design and Research Co., Ltd., TianJin 300222, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 4. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In the Loess Plateau, study on the response mechanism of runoff and sediment to land use change is of great importance for ecological regulation decision-making and the optimal allocation of soil and water conservation measures. Therefore, based on Jinghe Basin in the Loess Plateau as the research example, the Mann-Kendall test, accumulative-annual anomaly and double mass analysis were used to quantitatively examine the precipitation, runoff and sediment change and the characteristics of land use change in nearly 40 years, then the influences of the climate and land use change on runoff and sediment were discussed. Results showed that: (1) trends of annual precipitation of Jinghe Basin were different and not obvious; annual runoff depth and sediment transport modulus of the five watersheds showed the significant decline, especially in the 1980s—1990s; (2) it turned out that land use structure greatly changed in recent decades; major changes were the conversions of slope land to terrace, cultivated land to forestland and grassland, sandy bare land to grassland and thickets; (3) the influence of human activities on runoff and sediment contribution rates were 82.90% and 94.10%, respectively, the impacts of climate factors were very slight.

**Keywords:** runoff and sediment; land use change; extreme characteristic; Jinghe Basin

近几十年来,在气候和土地利用变化的共同影响下,黄河流域的水沙量发生了明显变化<sup>[1]</sup>。但径流量、输沙量和含沙量变化不一致,径流量和输沙量显著降低,含沙量却变化不明显,汛期含沙量甚至还偏高<sup>[2]</sup>。目前,我国各流域水沙动态变化对气候和土地利用变化响应的研究工作已成为环境、地理和生态等

科学的研究热点。王光谦等<sup>[3]</sup>认为人类活动是黄河流域土地利用和覆盖变化的主要驱动力,程磊等<sup>[4]</sup>对渭河流域 20 年间的土地利用时空变化进行研究,同样得出人类活动是渭河流域土地利用变化的主要驱动力的结论。但由于不同流域的研究尺度和研究方法存在相当大的差别,从而造成了研究结果的不同。

收稿日期:2014-09-03

修回日期:2014-10-08

资助项目:国家自然科学基金(51379008,41501041);流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题(泥 ZY1304,2014QN04)

第一作者:郑培龙(1976—),男,山西孟县人,硕士,工程师,研究方向为水土保持。E-mail:zhengpeilong1122@163.com

通信作者:赵阳(1986—),男,河北枣强人,博士,工程师,主要从事水土保持研究。E-mail:zhaoyang1224@163.com

刘昌明等<sup>[5]</sup>研究认为区域的降水变化是引起黄河上游流域径流变化的主要原因,而黄河中游流域则人类活动影响更为显著,因此两者对水沙动态变化的影响程度是因地而异的。因此,由以上研究结果可知,土地覆被变化是一个复杂的过程,需要将人为和自然因素合并讨论。

本文采用累积距平分析、Mann-Kendall 趋势检验和双累积曲线等方法,定量分析泾河流域近 50 年降水、径流和输沙的演变规律及研究区土地利用变化特征,探讨流域气候和土地利用变化对流域水沙动态变化的影响。旨在揭示泾河流域水沙动态变化对土地利用变化的响应机理,为黄土高原地区土地利用生态调控、水土保持措施的优化配置提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

泾河是渭河的第一大支流,水系发达,干流长约 455 km,流经面积 45 421 km<sup>2</sup>。流域地处黄土高原中部,地势西北高东南低,地貌类型主要有黄土高原沟壑、丘陵沟壑、丘陵林、阶地和土石丘陵。属大陆季风性气候,各区域四季温差明显,年平均气温 9℃ 左右。流域是半湿润半干旱过渡区,径流主要来自降雨。年平均降水量 550 mm,降水量由南向北递减,年际变化大,夏季量大多暴雨,冬季干旱少雨有霜或降雪。主要土壤类型为黄土和灰褐土,土质疏松,易水土流失。地植被为温带森林草原过渡类型,分布不均匀。流域西北部多为退化荒草地,草地质量较低。东南部多为山地植被,类型多样且覆盖率较高。

### 1.2 数据处理

1.2.1 数据采集 泾河流域径流泥沙数据(1971—2010 年)来自泾河流域出口水文控制站——张家山水文站;降水数据(1971—2010 年)来自于流域内的 11 个水文站点:洪德站、贾桥站、庆阳站、雨落坪站、袁家庵站、洪河站、巴家嘴站、毛家河站、泾川站、芦村河站和张家山站,考虑到流域水文站点较少,流域面降水量采用泰森多边形法计算求得。泾河流域土地利用数据主要来源于区域专题研究资料、流域所述行政区社会经济统计数据年鉴和相关出版文献资料<sup>[6-10]</sup>,研究时段主要包括:1986 年、1995 年和 2000 年 3 个时段。

### 1.2.2 研究方法

(1) Mann-Kendall 检验。Mann-Kendall 突变检验法<sup>[11]</sup>是检验气候突变,不易受少数异常值干扰的方法。具有  $n$  个样本量的时间序列  $x$ ,构造一个秩序列  $S_k$ ,它是第  $i$  时刻数值大于  $j$  时刻数值个数的累计数。

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad k=2,3,\dots,n \quad (1)$$

$$r_i = \begin{cases} +1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad j=1,2,\dots,n \quad (2)$$

在时间序列随机独立的假设下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad k=1,2,\dots,n \quad (3)$$

式中:  $UF_1 = 0$ ;  $E(S_k)$ ,  $\text{var}(S_k)$ ——累计数  $S_k$  的均值和方差,在  $x_1, x_2, \dots, x_n$  相互独立,且有相同连续分布时,通过下式计算:

$$\begin{cases} E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \\ \text{var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \end{cases} \quad (4)$$

$UF_k$  为标准正态分布,是按时间序列  $x$  顺序计算出的统计量序列,按时间序列  $x$  逆序  $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$ ,再重复上述过程,同时使得  $UB_k = -UF_k$  ( $k=n, n-1, \dots, 1$ ),  $UB_1 = 0$ 。绘制  $UF_k$  和  $UB_k$  序列曲线,若两曲线相交且交点在置信区间之内,则此交点可认为是突变点。

(2) 累积距平曲线。累积距平法可显现水文要素年际变化的阶段性特征。该方法先计算每年的水文要素距平,然后按年序累加,得到距平累积序列。采用累积距平法判断径流量和输沙量的序列突变年份。该方法是由曲线直观判断离散数据点变化趋势的一种非线性统计方法<sup>[12]</sup>。

时间序列  $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 其在某一时刻  $t$  的累积距平为:

$$LP_i = \sum_{j=1}^i (x_j - \bar{x}) \quad (5)$$

式中:  $LP_i$ ——第  $i$  年的距平累积值;  $x_i$ ——第  $i$  年的水文要素值;  $\bar{x}$ ——某水文要素的多年平均值。

根据距平有正有负的特点,当距平累积持续增大时,表明该时段内水文要素值大于平均值;当距平累积持续不变,表明该时段水文要素值等于平均值;当距平累积持续减小时,表明时段内水文要素值小于平均值。

(3) 双累积曲线法。双累积曲线法是进行时间序列分析的一种常用方法<sup>[13]</sup>,它的基本原理是两个变量按同一时间长度逐步累加,一个变量作为横坐标,另一个变量作为纵坐标,降水与径流的双累积曲线是可以揭示径流是否有趋势性变化的一种常用方法。对于正常的水文年份,如果不受外界影响,径流量累积值虽有波动,但没有系统偏离,降水与径流的双累积曲线应该是一条直线;如果流域下垫面发生了改变,则降水与径流双累积曲线会发生明显的转折。

(4) 以气候和土地利用变化对泥沙影响分析为

例,本研究以降雨—输沙量双累积曲线为依据,以曲线的转折点为划分的基准期和措施期,以此来评估人类活动下的土地利用变化对输沙量的影响。

经回归分析求得累积年降雨量与累积年输沙量的线性相关方程,将流域治理后不同时间段的累积年降雨量值分别代入方程中,求得累积年输沙量,然后与同期实测值比较,即得减沙效应。计算公式如下:

$$\eta = \frac{R_1 - R_2}{R_1} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $R_1$ ——利用累积年降雨量—累积年输沙量的线性相关方程计算出的年输沙量; $R_2$ ——流域治理后的实测年输沙量。

通过建立基准期降雨—输沙关系,用以计算措施期预期自然输沙量,将其与基准期平均输沙量相比得到降雨变化对输沙的影响量,将其与实际观测输沙量对比,得到人类活动影响量<sup>[14]</sup>:

$$\Delta S = Q_{S_2} - Q_{S_1} = \Delta S_1 + \Delta S_2 \quad (7)$$

$$\Delta S_1 = Q_{S_2} - Q'_{S_2} \quad (8)$$

$$\Delta S_2 = \Delta Q'_{S_2} - Q_{S_1} \quad (9)$$

式中: $\Delta S$ ——流域输沙变化总量; $Q_{S_2}$ ——措施期实测输沙量; $Q_{S_1}$ ——基准期输沙量之差; $\Delta S_1$ ——人类活动的影响量; $\Delta S_2$ ——降雨变化的影响量; $Q'_{S_2}$ ——措施期计算输沙量。此外,采用相同原理就气候和土地利用变化对径流影响分析进行了研究。

## 2 结果与分析

### 2.1 流域降水及水沙过程年际变化规律

由图 1 可知,泾河流域降水呈现出下降趋势。从 5 年滑动平均趋势线可看出泾河流域 20 世纪 90 年代前降水量无明显的趋势性变化,但 1991—2001 年降水量下降显著,2003 年之后开始回升。泾河平均年径流深较小,其中最大和最小径流深分别为 51.03, 13.96 mm。从线性趋势线的走势来看,泾河年径流深逐年下降。泾河的最大输沙模数发生在 1973 年,最小输沙模数发生在 1972 年,均为早期的研究时期,且输沙模数的年际变化很大。从 5 年滑动平均趋势线可看出,虽然年际间存在波动变化,但从 70 年代开始输沙模数有了明显下降。泥沙量的减少主要是由于流域径流近些年急剧下降造成的。泾河的水沙动态变化基本同步。

### 2.2 流域水沙过程突变分析

由图 2 可知,径流深的年际变化特征十分明显,呈现先增大后减小的趋势。泾河流域突变点发生在 1985 年,发生第一次突变前累积距平值呈增加趋势,此阶段径流数据大于平均值。之后在 1996 年出现突变

拐点,80—90 年代中期累积距平值由上升变为急剧下降变化,说明进入径流偏小的阶段,这与 90 年代降水的减少有明显关系。输沙模数累积距平变化与径流的变化基本相一致。泾河流域输沙模数在 1996 年发生第一次突变,其前后累积距平值为显著上升和显著下降的趋势,说明输沙模数由偏高阶段转为偏低阶段,这与径流的变化有明显相关性。

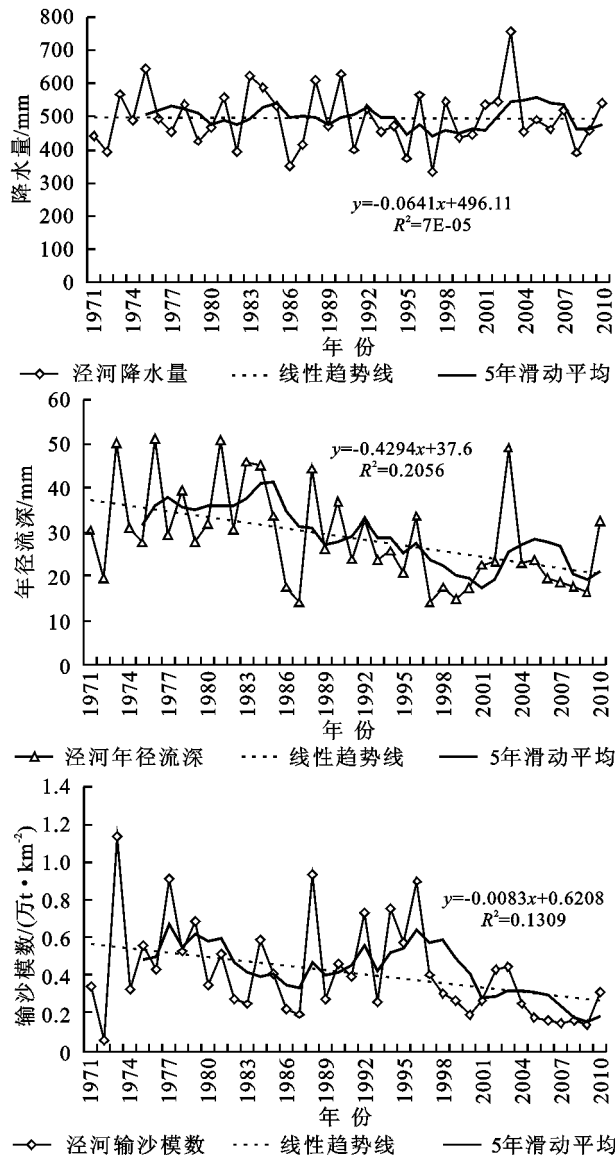


图 1 泾河水文要素变化趋势

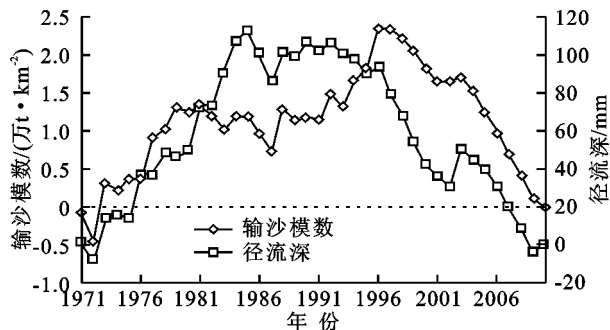


图 2 泾河流域的径流量和输沙量的突变特征

2.3 流域土地利用变化

从表 1 可以看出,泾河流域 1986—1995 年林地、草地和水域 3 种土地利用类型面积略有减少,相应的耕地、城镇用地和未利用地面积略有增加。然而,

1995—2000 年林地、草地和水域逐渐恢复接近原来的面积,耕地和未利用地减少,城镇用地继续增加。可见,泾河流域土地利用类型在两个时期内发生着由生态型向人工型转化,再由人工型恢复到生态型的循环。

表 1 泾河流域土地利用面积变化

土地利用类型	1986 年		1995 年		2000 年	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
林地	4764.60	10.49	4526.60	9.97	4686.13	10.32
草地	19830.79	43.66	19526.64	42.99	19605.76	43.16
水域	248.38	0.55	227.63	0.50	236.71	0.52
耕地	18990.32	41.81	19394.99	42.70	19192.01	42.25
城乡建设用地	688.07	1.51	763.94	1.68	776.27	1.71
未利用土地	898.84	1.98	981.20	2.16	924.13	2.03
总和	45421.00	100.00	45421.00	100.00	45421.00	100.00

2.4 土地利用变化对水沙过程的定量影响

降雨—径流量、降雨量—输沙量的双累积曲线的斜率代表单位降水所产生的径流量和输沙量。在自然状态下,降雨与径流输沙量的关系应该是一定的。如果流域下垫面发生了改变,则其双累积曲线斜率会发生明显的转折。当曲线发生转折时,说明下垫面受人类活动影响改变,从而影响了径流输沙。从图 3—4 可以看出,在各流域降水—径流、降雨量—输沙量的双累积曲线图中存在转折点。由此可见流域径流对降水变化响应划分为基准期和变化期。第一次突变前的时期,相对于突变后的时期可看作为径流输沙的自然基准期,流域下垫面产流产沙受降雨外的其他条件影响极弱。我们可以发现各流域的变化期降水—径流、降雨量—输沙量的双累积曲线图的斜率均较上一时段减小,说明其为显著下降阶段,下垫面受人类活动影响显著。并且,各流域受影响程度有差异,各阶段拟合方程的判定系数大部分都大于 0.95,拟合度高。

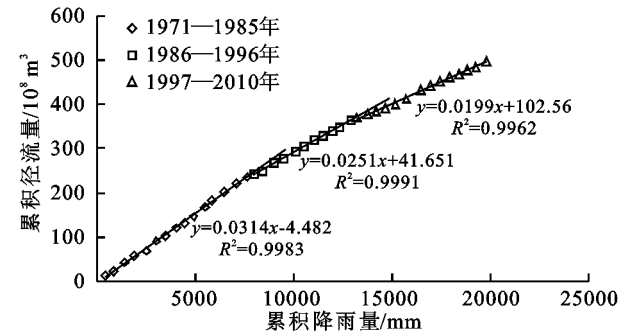


图 3 不同时段降雨量—径流量双累积曲线

根据研究流域降水—径流、降水—输沙的双累积曲线在研究系列的变化趋势及突变点,对流域径流输沙研究时间序列进行了阶段划分。并分别计算了研究流域气候变化和土地利用变化对流域径流输沙的定量影响。

由表 2—3 可知,泾河流域人类活动因素对流域径

流影响贡献率为 82.90%,是气候贡献率的 4.85 倍;泾河流域人类活动因素对流域输沙量影响贡献率为 94.10%,气候贡献率仅为 5.90%。人类活动因素是研究流域径流发生变异的主要驱动因素,土地利用变化是主要的人类活动表现。虽然气候对流域径流变化产生影响,但影响贡献率均较小。

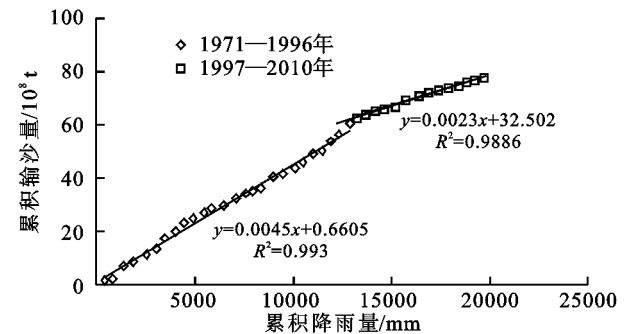


图 4 不同时间段降雨量—输沙量双累积曲线

表 2 线性回归方程拟合

项目	自然阶段(第一阶段)累积回归方程
降雨—径流量	$\sum R=0.0314 \sum P-4.482$
	$(R^2=0.9983, N=15)$
降雨—输沙量	$\sum S=0.0045 \sum P+0.6605$
	$(R^2=0.993, N=26)$

3 结论与讨论

(1) 泾河流域降水、径流输沙均呈减少趋势,且径流输沙减小趋势更为明显。径流突变时间为 1985 年和 1996 年,与降雨变化有关;输沙突变时间为 1996 年。

(2) 泾河流域主要土地利用类型为林地、草地和耕地。主要变化是坡耕地向梯田的转换、耕地向林地、草地的转换和沙地、裸地向草地、灌丛的转换。

(3) 土地利用变化是泾河流域径流输沙发生变异的主要驱动因素,贡献率均大于 80%;而降水影响贡献率则较小。但较之人类活动对径流影响而言,人类活动对流域输沙量的影响较大。

表 3 泾河流域径流输沙量对气候和土地利用变化的响应

项目	时间段	累积降水/ mm	输沙			降水因素		人类活动因素	
			实测值/ 10 <sup>8</sup> t	计算值/ 10 <sup>8</sup> t	总减少量/ 10 <sup>8</sup> t	影响量/ 10 <sup>8</sup> t	贡献率/ %	影响量/ 10 <sup>8</sup> t	贡献率/ %
径流	1971—1985 年	7609.58	15.664	—	—	—	—	—	—
	1986—1996 年	5264.08	11.729	14.619	3.934	1.045	26.6%	2.890	73.4
	1997—2010 年	6918.38	9.547	15.197	6.117	0.467	7.6%	5.650	92.4
输沙	1971—1996 年	12873.66	2.336	—	—	—	—	—	—
	1997—2010 年	6918.38	1.226	2.271	1.110	0.065	5.9%	1.045	94.1

引起了区域气候变化的因子主要有降水、温度、辐射、湿度、风速等,它们综合作用于气候影响下的环境。但由于数据采集获取等有限,时间序列长度的温度影响不够强烈,本研究气候变化主要指降水变化,这对研究结果的准确性有一定影响,条件允许的情况下应当加强影响生态水文过程的其他气候因子的分析。

参考文献:

[1] Liu C, Sui J, Wang Z Y. Changes in runoff and sediment yield along the Yellow River during the period from 1950 to 2006[J]. Journal of Environmental Informatics, 2008, 12(2): 129-139.

[2] 张学成,王玲,高贵成. 黄河泥沙动态分析[J]. 泥沙研究, 2002(1): 43-52.

[3] 王光谦,王思远,陈志祥. 黄河流域的土地利用和土地覆盖变化[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(9): 1218-1222.

[4] 程磊,徐宗学,罗睿,等. 渭河流域 1980—2000 年 LUCC 时空变化特征及其驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 1-6, 30.

[5] 刘昌明,张学成. 黄河干流实际来水量不断减少的成因分析[J]. 地理学报, 2004, 59(3): 323-330.

[6] 王小军,蔡焕杰,张鑫,等. 皇甫川流域水沙变化特点及其趋势分析[J]. 水土保持研究, 2009, 16(1): 222-226.

[7] 李庆云,吕素冰,刘蕾,等. 黄土高原藉河流域近 35 a 来土地利用/覆被变化过程[J]. 华北水利水电学院学报, 2013, 34(6): 32-35.

[8] 吴琳娜,杨胜天,刘晓燕,等. 1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 54-63.

[9] 杨丽,谢高地,甄霖,等. 泾河流域土地利用格局的时空变化分析[J]. 资源科学, 2005, 27(4): 26-32.

[10] 张程,李小兵,张立,等. 皇甫川流域土地利用/覆被变化对生态服务价值的影响[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2009, 45(4): 399-403.

[11] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和监测方法[J]. 大气科学, 1992, 12(4): 482-493.

[12] 赵广举,穆兴民,温仲明,等. 皇甫川流域降水和人类活动对水沙变化的定量分析[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(4): 1-8.

[13] 穆兴民,巴桑赤烈, Zhang Lu, 等. 黄河河口镇至龙门区间来水来沙变化及其对水利水保措施的响应[J]. 泥沙研究, 2007, 52(2): 36-41.

[14] 王国庆. 气候变化对黄河中游水文水资源影响的关键问题研究[D]. 南京: 淮海大学, 2006.

(上接第 19 页)

[13] 汤国安,杨昕. 地理信息系统空间分析试验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[14] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(8): 1533-1543.

[15] 延昊,王长耀. 遥感植被指数对多时相 AVHRR 数据主成分分析的影响[J]. 遥感学报, 2002, 6(1): 30-34.

[16] 游松财,李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算: 以江西省泰和县灌溪乡为例[J]. 自然资源学报, 1999, 14(1): 63-67.

[17] 中华人民共和国行业标准. 土壤侵蚀分类分级标准 SL190-2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.

[18] 薛亮,任志远. 基于空间马尔科夫链的关中地区生态安全时空演变分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1): 114-118.

[19] 李天宏. 基于 RUSLE 模型的延河流域 2001—2010 年土壤侵蚀动态变化[J]. 自然资源学报, 2012, 27(7): 1165-1175.

[20] 朱萌,马孝义,刘雪娇. 基于马尔科夫模型的武功县土地利用/覆被动态变化研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 64-68.

[21] 李德成,徐彬彬,石晓日. 利用马氏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[J]. 环境遥感, 1995, 10(2): 89-96.

[22] 刘晓阳,李纪人. 雷达估测降水模拟史灌河流域径流[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2002, 38(3): 342-349.

[23] 江青龙,谢永生. 京津水源区小流域土壤侵蚀空间模拟[J]. 生态学杂志, 2011, 30(8): 1703-1711.

[24] 石香琼,查轩,陈世发. 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[J]. 水土保持研究, 2009, 16(4): 19-23.