

\*\*\*\*\*  
试  
验  
研  
究  
\*\*\*\*\*

# 土地利用和气候变化对四川省紫色丘陵区 径流泥沙变化的影响研究

曾 贇<sup>1</sup>, 魏 琳<sup>2</sup>

(1. 四川农业大学 信息工程技术学院, 四川 雅安 625014; 2. 四川省金堂县水务局, 四川 金堂 610400)

**摘 要:** 嘉陵江紫色丘陵区的土壤侵蚀是造成该流域下游水土流失严重的主要根源。选取四川省紫色丘陵区的李子溪流域为研究区, 根据反映“长治”工程实施前后的 1986, 1999 和 2001 年影像数据, 应用 GIS 技术解译得到了该流域 3 个时期的土地利用图, 并利用 SWAT 模型对这 3 个时期的土地利用情形进行了产流产沙模拟。在 1986 年土地利用图的基础上, 假设了 7 种不同土地利用情景以及 9 种不同气候组合, 以评价土地利用变化和不同气候条件对李子溪流域径流泥沙的影响。研究结果表明: (1) 1989 年实施“长治”工程后, 林地面积持续增加, 水田、旱地面积持续减少, 且林地增加的面积主要来自于水田和旱地; (2) 林地覆盖率增加, 耕地减少的土地利用变化对流域产流产沙量的减小影响显著, 说明了“长治”工程实施后, 以退耕还林和植树造林为主的理措施具有水土保持作用, 且在大于 25° 的坡耕地上实施退耕还林措施对减少地表径流, 拦截泥沙效果更显著。

**关键词:** SWAT 模型; 土地利用变化; 气候变化; 径流; 产沙量; 李子溪流域; 紫色丘陵区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)03-0001-06

中图分类号: S157.1

## Impacts of Climate and Land Use Changes on Runoff and Sediment Yield in Sichuan Purple Hilly Area

ZENG Yun<sup>1</sup>, WEI Lin<sup>2</sup>

(1. College of Information and Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China; 2. Water Authority of Jintang County, Jintang, Sichuan 610400, China)

**Abstract:** Serious soil erosion in the purple hilly areas of Jialing River basin is the major source of soil and water loss in the lower and middle reaches of the river. Lizixi watershed in Sichuan Province was chosen as the study area. Land use data were extracted by RS and GIS technology from remote sensing images (Landsat TM/ETM<sup>+</sup> and Spot Images) in 1986, 1999 and 2001 representing the conditions at the three periods before and after implementing the key control project of soil and water conservation in the upper reaches of the Yangtze River (referred to as the "Changzhi" project). The distributed hydrological model SWAT was used to simulate runoff and sediment yield based on the land use data at the three periods. Based on the land use map in 1986, the impacts of land use changes and different climates on runoff and sediment yield in Lizixi watershed were evaluated by making an assumption of 7 different land use conditions and 9 different climate combinations. The simulated results show that: (1) After the implementation of the "Changzhi" project, paddy fields and dry land area continued to decrease, and forest area continued to increase from 1986 to 2001, which was mainly transformed from paddy fields and dry land. (2) The land use changes of increased forest area and decreased farmland had an obvious influence on runoff and sediment yield, which showed that the control measures, mainly in the form of returning farmland to forestry and afforestation, had effects on soil and water conservation. In terms of conserving water and intercepting sediment, forestry was better than grassland, and grassland was better than farmland. Taking the measure of returning farmland to forestry and

收稿日期: 2013-03-06

修回日期: 2013-04-18

资助项目: 国家科技支撑计划项目“四川省新农村建设科技集成研究与示范”(2010NZ0105); 四川省教育厅科研项目“李子溪流域水沙变化规律与计算模拟”(12ZB308); 四川农业大学本科论文培育计划项目

作者简介: 曾贇(1978—), 男(汉族), 江西省新余市人, 博士生, 讲师, 研究方向为农业水土工程。E-mail: ericazeng@163.com。

grassland in  $>25^\circ$  farmlands had more obvious effects on reducing surface runoff and intercepting sediment than  $15^\circ\sim 25^\circ$  farmlands.

**Keywords:** SWAT model; land use change; climate change; runoff; sediment yield; Lizixi watershed; purple hilly area

气候和土地利用变化是影响流域产流产沙的两个重要因素。SWAT (soil and water assessment tool) 模型是一个利用 GIS 和 RS 强大空间分析功能, 模拟多尺度流域连续时间段的水文、土壤侵蚀及污染物迁移转化过程的流域分布式水文模型<sup>[1]</sup>。它能预测流域在气候变化和土地利用变化条件下对径流、泥沙和污染物的影响。近年来, 国内学者利用 SWAT 模型分别在雅鲁藏布江的拉萨河流域<sup>[2]</sup>、长江上游梭磨河流域<sup>[3]</sup>和清港河流域<sup>[4]</sup>、岷江上游流域<sup>[5]</sup>、汉江上游丹江口以上流域<sup>[6]</sup>、黄河源区<sup>[7]</sup>、黄河中游伊洛河流域<sup>[8]</sup>、黄土区蔡家川流域<sup>[9]</sup>和马家沟流域<sup>[10]</sup>、陇东黄土高原的马莲河流域<sup>[11]</sup>、湘江流域<sup>[12]</sup>、北京密云水库流域<sup>[13]</sup>等流域开展了气候或土地利用变化对径流、泥沙过程的影响研究, 尤其是对径流影响进行了较多的研究。以上流域因研究尺度、位置、土壤、气候等方面的差异性, 各研究区呈现出不同规律<sup>[13]</sup>, 而且利用 SWAT 模型对川中紫色丘陵地区开展的类似研究相对较少。因此, 在川中紫色丘陵流域利用 SWAT 模型开展不同气候和土地利用条件对径流和泥沙的影响研究是可行而且是有必要的。

长江中上游地区的水土流失是造成中下游地区洪涝灾害的重要原因之一。作为长江一级支流的嘉陵江是长江泥沙的主要来源区<sup>[14]</sup>。嘉陵江中下游由于自然地理条件及人类活动的长期破坏, 水土流失十分严重, 流失面积约  $7.00 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 年平均土壤侵蚀量达  $3.20 \times 10^8 \text{ t}$ , 1988 年被国务院列为长江上游水土保持重点防治区<sup>[15-16]</sup>。紫色土丘陵区占耕地面积 60% 的坡耕地是造成嘉陵江中下游水土流失严重的主要根源。自 1989 年启动长江中上游水土保持重点防治工程 (简称“长治”工程) 以来, 经过 20 a 多的建设, 水土流失的治理和生态环境的保护已经取得显著成效。嘉陵江中下游作为“长治”工程重点治理区之一, 通过退耕还林、坡改梯等水土保持工程建设, 水土流失治理同样取得了明显成效<sup>[16]</sup>。李子溪为嘉陵江中游一条支流, 该流域主要为紫色土, 是四川紫色丘陵中度流失区的典型代表流域<sup>[17, 18]</sup>。为了评价退耕还林、坡改梯等水土保持治理措施在川中紫色丘陵区的长期效果, 本文以李子溪流域为示范区, 创建了不同气候和土地利用情景, 借助 SWAT 模型定量分析“长治”工程前后气候和土地利用的变化对李子

溪流域产流产沙的影响。这可为正确评估紫色丘陵区变化环境条件下水沙的演变过程提供科学依据, 对制定长江流域水土保持管理措施有着重要的意义。

## 1 流域概况

李子溪为嘉陵江中游的一条支流。该流域地处四川盆地中部丘陵区, 地理坐标在北纬  $30^\circ 22' - 30^\circ 42'$ , 东经  $105^\circ 47' - 106^\circ 06'$  之间, 总面积  $683.15 \text{ km}^2$ <sup>[17]</sup>。流域大部分行政区位于四川省南充市嘉陵区, 其西部和南部的部分行政区划属于遂宁市的蓬溪县和广安市的武胜县。

研究区属于四川盆地中亚热带湿润气候, 具有冬暖夏热, 光热充足, 降雨充沛的气候特点。流域年平均气温  $17.4^\circ\text{C}$ , 年际间变化不大。年平均降水量  $1010.6 \text{ mm}$ , 80% 左右集中在 5—10 月。夏季光热资源丰富, 而且自然降雨时空分布不均, 易出现连续高温或连日大雨、暴雨, 形成干旱与洪涝灾害。李子溪流域土地利用类型以旱地、水田和林地为主, 三者占流域总面积的 95% 以上。主要土壤为黄壤、紫色土和冲积土, 自然植被少见, 农作物栽培面积大, 种类较多<sup>[18]</sup>。由于研究区域地势北高南低, 西高东低, 地势高差大, 且紫色土层浅薄, 土壤胶体品质差, 加上境内降水量丰富, 使得流域土壤侵蚀严重。李子溪流域作为川中紫色丘陵区的代表流域, 在水土流失类型、规律和成因方面与其基本一致, 故本文选择该流域作为研究不同气候及土地利用变化对紫色丘陵区产流产沙影响的典型区域。

## 2 研究资料及研究方法

### 2.1 数据来源

我国先后在 1983—1990, 1999, 2001 年开展了三次全国土壤侵蚀遥感调查, 因此本文采用的数据主要包括: 1986 年 8 月 9 日、1999 年 5 月 9 日的 Landsat TM 影像两景, 2001 年 5 月 22 日的 Landsat ETM 图像一景, 1989 年 11 月 28 日、1999 年 8 月 5 日的 SPOT 影像两景; 李子溪流域 1:5 万地形图; 南充气象站 1970—1986 年的气象数据, 其中 1970—1979 年资料用于率定, 1980—1986 年资料进行验证; 南充市嘉陵区土地利用总体规划 (1997—2001); 赵家祠水文站 1976—2001 年的径流泥沙资料。数据处理软件包括 ArcView, Erdas, ArcGIS 等。

## 2.2 数据处理方法

将李子河流域 1:5 万地形图数字化,生成分辨率为 90 m 的数字高程 DEM 图。以 1:5 万地形图为底图,将 1986,1999 年 TM 影像、2001 年 ETM<sup>+</sup> 影像和 1989,1999 年 SPOT 影像进行纠正和配准。由于 TM 影像光谱分辨率高,而 SPOT 影像空间分辨率高,因此,将上述 TM/ETM 影像与 SPOT 影像分别融合作为 1986,1999 和 2001 年的遥感信息源。通过建立的遥感解译标志,利用 ArcGIS 对李子河流域的遥感影像进行目视解译,分别生成 1986,1999 和 2001 年土地利用图(见附图 1)。土地利用类型参照全国土地资源一、二级分类标准,结合该流域土地资源和利用属性,划分出 6 类,即旱地、水田、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地和未利用地。利用 ERDAS9.2 中的精度评价功能,得到 Kappa 系数分别为 0.79,0.83 和 0.75,大于 0.7 的最低判别精度要求<sup>[19]</sup>,符合研究需要。在 SWAT 模型上加载土地利用图后对原土地利用进行重分类,将土地利用图的栅格属性值转换为 SWAT 模型要求的土地利用代码,最终得到符合 SWAT 模型模拟要求的土地利用图。

模型中用到的土壤数据包括 1:5 万的土壤图和土壤物理属性数据。物理属性数据中的土壤剖面最大根系深度、土壤表层到土壤底层深度和有机质含量由《四川土种志》<sup>[20]</sup>得到。土壤中可利用水量和饱和水力传导系数则采用土壤水特性软件 SPAW 进行估算,并在模型率定过程中进行调整,估算结果可以初步反映土壤参数的空间分布特征<sup>[13]</sup>。

## 3 结果与讨论

### 3.1 土地利用的时空变化

李子河流域自 1988 年被列为全国水土保持的重点防治区以来,在流域内实行了退耕还林、坡改梯等水土保持措施,20 a 来土地利用发生了变化。本文选取 1986 年(代表“长治”工程实施前)和 1999 年、2001 年(代表“长治”工程实施 10 a 多后)的土地利用图,利用 ArcGIS9.2 运算得到不同时期土地利用类型面积及其变化情况(见表 1)。由表 1 可见,旱地、水田和林地是李子河流域的主要土地利用类型,三者占流域总面积的 95% 以上。1986 年李子河流域的旱地、水田、林地分别占流域面积的 68.16%,25.54%,3.67%。1989 年开始实施“长治”工程后,李子河流域的土地利用发生明显变化,其变化特点为林地、居民用地面积呈现持续增加趋势,而水田、旱地、草地、水域、难用地面积呈现持续减少趋势,其中林地增加的面积主要来自于水田和旱地减少的面积。1986—1999 年水田、旱地面积分别减少 2.65% (18.10 km<sup>2</sup>)和 2.32% (15.85 km<sup>2</sup>),而林地面积增加了 5.02% (34.29 km<sup>2</sup>)。如果以 1986 年数据为基数计算,1999 年水田、旱地面积分别减少了面积 10.38% 和 3.40%,林地面积增加 137.78%。1999—2001 年短短 2 a 时间,旱地减少了 6.69 km<sup>2</sup>,林地面积增加了 5.81 km<sup>2</sup>,表明旱地面积减少的趋势和林地面积增加的趋势在增加。以上数据说明“长治”工程实施后,采取的以退耕还林、植树造林为主的水土流失治理措施,取得了一定成效。

表 1 1986—2001 年流域土地利用面积比例及变化

项目	1986 年		1999 年		2001 年		1986—1999 年变化		1999—2001 年变化	
	面积/ km <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ km <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ km <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ km <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ km <sup>2</sup>	比例/ %
水田	174.48	25.54	156.37	22.89	157.53	23.06	-18.10	-2.65	1.16	0.17
旱地	465.64	68.16	449.79	65.84	443.09	64.86	-15.85	-2.32	-6.69	-0.98
林地	25.07	3.67	59.37	8.69	65.17	9.54	34.29	5.02	5.81	0.85
草地	2.19	0.32	0.89	0.13	0.89	0.13	-1.30	-0.19	0.00	0.00
居民用地	1.16	0.17	4.30	0.63	4.10	0.6	3.14	0.46	-0.20	-0.03
水域	12.43	1.82	10.59	1.55	10.52	1.54	-1.84	-0.27	-0.07	-0.01
难用地	2.19	0.32	1.84	0.27	1.84	0.27	-0.34	-0.05	0.00	0.00

为详细研究该流域内的土地利用转移情况,可进一步利用 ArcGIS 得到流域各时期土地利用转移矩阵(见表 2)。土地利用转移矩阵既可以揭示不同时期土地利用结构,也可以定量反映不同类型之间的转化状况,进而分析土地利用格局的时空演变过程<sup>[21]</sup>。

表 2 显示,李子河流域土地类型转移主要在旱地、林地、水田间进行。从 1986—2001 年的土地转移矩阵可以看出,在旱地的减少量中,大部分转变为林地(39.33 km<sup>2</sup>)和水田(16.93 km<sup>2</sup>),也有少量转化为居民用地(2.62 km<sup>2</sup>)。而水田减少量中有 31.58 km<sup>2</sup>

转化为旱地,1.69 km<sup>2</sup> 转化为林地。可见退耕还林和植树造林取得了很好的效果,同时通过陡坡退耕还林,坡改梯田,不稳定的山坡上将水田改为旱地以及低丘陵区旱地改水田等措施,综合治理水土流失,改善了土地质量,提高了土地的肥力。草地有1.40 km<sup>2</sup> 转化为旱地,反映了草地被大量开垦为耕地。水域有1.99 km<sup>2</sup> 转化为耕地,0.28 km<sup>2</sup> 转化为水田,可见当地人们利用水域开垦耕地比较普遍。由表 2 可以看到,尽管旱地面积有 39.33 km<sup>2</sup> 转化为林地,但是由

水田、水域、林地、草地转化为旱地的有 36.82 km<sup>2</sup>,这就是表 1 反映出来的旱地面积减少比例只有 3.3% 的原因。

总体来看,李子河流域的农业耕作活动是土地利用类型变动的主要驱动力,由于李子河流域是全国水土保持的重点防治区,且林地面积所占比重相对较少,因此流域内土地利用类型仍旧是在旱地、水田、林地之间进行变动,并且耕地减少,林地增加这种趋势将继续持续下去。

表 2 1986—2001 年土地利用转移矩阵

km<sup>2</sup>

类型	2001 年						
	旱地	林地	草地	水域	居民用地	难利用地	水田
旱地	409.99	39.33	0.00	0.42	2.62	0.01	16.93
林地	1.85	22.63	0.00	0.02	0.04	0.00	0.20
草地	1.40	0.00	0.78	0.00	0.00	0.00	0.00
1986 年 水域	1.99	0.00	0.00	9.89	0.00	0.00	0.28
居民用地	0.00	0.09	0.00	0.00	1.05	0.00	0.00
难利用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.12	0.00
水田	31.58	1.69	0.00	0.03	0.55	0.00	137.85

### 3.2 土地利用变化对流域产流产沙的影响

根据 1970—1986 年气象数据,利用 SWAT 模型分别模拟出 1986,1999 年和 2001 年土地利用下的流域产流产沙的结果(见表 3)。

表 3 不同土地利用变化下的径流泥沙模拟结果

项目	1986 年		1999 年		2001 年	
	模拟值	实测值	模拟值	模拟值	模拟值	模拟值
年均径流深/mm	245.24	271.96	215.64	208.32		
年均泥沙量/(t·hm <sup>-2</sup> )	10.28	11.67	6.20	5.78		

表 3 反映是 1970—1986 年气候条件情况下,土地利用变化对径流泥沙变化的影响。在 1970—1986 年的气候条件下,将 1986 年的土地利用图输入 SWAT 模型中,模拟得到年平均径流深 245.24 mm,年平均泥沙量 10.28 t/hm<sup>2</sup>。它们与年平均实测值相差都不超过 15%,这说明模拟结果是可以接受的。与 1986 年年均实测值相比,1999 年土地利用条件下模拟得到年均径流减少了 20.71%(56.32 mm),年均泥沙量减少 46.87%(5.47 t/hm<sup>2</sup>),泥沙量减少的幅度大于径流量减少的幅度。这表明流域泥沙量的减小不仅仅受降雨产生的径流影响,而且受土地利用变化的影响,同时土地利用变化对径流和产沙都有减少作用,并且减沙的作用更为明显。这与庞靖鹏<sup>[13]</sup>、张志强<sup>[22]</sup>、陈月红<sup>[23]</sup>、刘淑燕<sup>[24]</sup>等人的研究结果相一致。

由表 1 和表 3 可见 1986—2001 年,林地面积增加 5.87%,旱地和水田共减少 5.78%,年均径流减少 23.4%(63.64 mm),年均泥沙量减少 50.47%(5.89 t/hm<sup>2</sup>)。这说明随着林地面积的增多,耕地(旱地和水田)面积的减少,流域年均径流量和泥沙量都有大幅减少,而且泥沙量相对径流量减少的更为明显。这说明了退耕还林等水保措施对保护水土流失和改善生态环境有较大帮助。

为了研究林地、草地、耕地及不同坡度的耕作方式对流域产流产沙的影响程度,假设了 7 种不同情景下的土地利用方式。情景 S<sub>1</sub>:流域内耕地、草地和水田全部转为林地;情景 S<sub>2</sub>:流域全为草地;情景 S<sub>3</sub>:流域全为耕地;情景 S<sub>4</sub>:将坡度大于 25°的耕地全部转为草地;情景 S<sub>5</sub>:将坡度大于 25°的耕地全部转为林地;情景 S<sub>6</sub>:将坡度 15°~25°的耕地全部转为草地;情景 S<sub>7</sub>:将坡度 15°~25°的耕地全部转为林地。

以 1970—1979 年的气象数据为基础,采用 1986 年的土地利用图,先模拟时段为 1970—1979 年的年均径流量和年均泥沙量,记为现状值;然后再分别模拟不同情景下,时段为 1970—1979 年的年均径流量和年均泥沙量。

年均变化率( $R_E$ )定义如下:

$$R_E = (V_i - V_o) / V_o \times 100\%$$

式中:  $V_i$ ——不同情景下的模拟值;  $V_o$ ——现状值<sup>[25]</sup>。模拟结果见表 4。

表 4 不同土地利用情景下的产流产沙模拟结果

情景	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	现状值	
径流	年均径流深/mm	106.17	179.99	250.50	180.21	174.45	194.72	194.72	230.95
	径流变化率/%	-54.03	-22.06	8.47	-21.97	-24.46	-15.69	-15.69	—
泥沙	泥沙量/(t·hm <sup>-2</sup> )	0.08	0.20	15.06	4.11	3.05	5.17	5.17	11.07
	泥沙变化率/%	-99.29	-98.17	36.04	-62.87	-72.45	-53.27	-53.27	—

(1) 土地利用变化对流域内泥沙和径流影响分析。在各种不同情景条件下,年均泥沙量的变化率均大于相应情景下年均径流的变化率。径流的平均变化率为 20.78%,泥沙的平均变化率为 57.61%,较径流增加了 36.83%,说明土地利用变化对泥沙的影响较径流大,泥沙较径流对土地利用方式的改变更为敏感,这也印证了本文前面的分析。

(2) 流域内全部还林、还草和全部开垦为耕地的对比分析。从表 4 中可以看出 S<sub>1</sub> 情景下年均径流量和年均泥沙量分别较现状值减少了 54.03% 和 99.29%; S<sub>2</sub> 情景下年均径流量和年均泥沙量分别较现状值减少了 22.06% 和 98.70%; S<sub>3</sub> 情景下年均径流和年均泥沙量分别增加了 8.47% 和 36.04%。说明流域内全部还林还草年均径流和年均泥沙都将大大减少,说明退耕还林还草措施对减少水土流失有显著作用。流域内地表全部还林较全部还草产生的径流量和泥沙量分别减少了 31.97% 和 1.12%,表明了林地减水减沙的效果比草地好,尤其是减水方面。在流域内地表全部为耕地的情景下,年径流量和泥沙量都较现状值增大,尤其是泥沙的增加程度较大,说明如果流域过度开垦成耕地,将会造成大量水土流失,最不利于流域内的水土保持。

(3) 流域内大于 25° 耕地还林、还草对比分析。在 S<sub>4</sub> 和 S<sub>5</sub> 情景下年径流和泥沙量较现状值分别减少了 21.97% (24.46%) 和 62.87% (72.45%)。模拟结果表明,在 25° 坡耕地上还林或还草都能减少地表径流和泥沙,而且就减少水沙的效果来说,退耕还林比退耕还草更好。

(4) 流域内 15°~25° 的坡耕地还林、还草对比分析。S<sub>6</sub> 情景和 S<sub>7</sub> 情景下年径流和泥沙量较现状值减少相同。模拟结果表明,在 15°~25° 的坡耕地上植树和种草没有区别。

(5) 流域内 25° 以上耕地还林还草与 15°~25° 的坡耕地还林还草对比分析。对比 S<sub>5</sub> 与 S<sub>7</sub> 情景以及 S<sub>4</sub> 与 S<sub>6</sub> 情景,在大于 25° 的坡耕地上实行还林(还草)措施比在 15°~25° 的坡耕地上年径流量和泥沙量分别多减少了 8.78% (6.28%) 和 19.18% (9.60%)。模拟结果表明,在大于 25° 的坡耕地上实行还林还草措

施在拦截径流和泥沙方面的效果均好于 15°~25° 的坡耕地。

### 3.3 气候变化对产流产沙的影响

为定量反映气候变化对流域产流产沙影响的程度,以 1970—1979 年气象数据和 1986 年土地利用图为基础,不考虑流域内降水和气温的空间变化,通过改变降雨和气温条件来模拟气温和降雨对流域径流和泥沙的影响。参考文献[26]指出,到 2050 年,全国平均气温将升高 2.2℃。为此,本文设置了 9 种不同气温和降雨量的组合:气温 T 升高 2℃,不变,降低 2℃;降雨量 P 增加 10%,不变,减少 10%。不同气候组合情况见表 5,其中情景 C<sub>5</sub> 为参照值。借助 SWAT 模型分别模拟出各种情景下年均径流量和年均泥沙量。模拟结果如表 6 所示。

表 5 不同降雨和温度的组合

温度/℃	降雨量		
	P(1-10%)	P	P(1+10%)
T-2	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
T	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>
T+2	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>9</sub>

表 6 不同气候情景下的产流产沙模拟结果

项目	温度/℃	降雨量		
		P(1-10%)	P	P(1+10%)
年均径流深/mm	T-2	165.67	233.46	257.73
	T	157.78	230.95	251.96
	T+2	147.74	210.05	241.86
年均径流量变化率/%	T-2	-28.27	1.09	11.60
	T	-31.68	0.00	9.10
	T+2	-36.03	-9.05	4.72
年均泥沙量/(t·hm <sup>-2</sup> )	T-2	5.43	12.84	14.32
	T	5.22	11.07	13.21
	T+2	4.17	7.5	12.61
年均泥沙量变化率/%	T-2	-50.95	15.99	29.36
	T	-52.85	0.00	19.33
	T+2	-62.33	-32.25	13.91

(1) 从表 6 可以得到,在同种气候组合模拟下(除去 S<sub>5</sub> 情景)。泥沙的变化率大于径流的变化率,8

种气候组合下年均径流平均变化率为 9.82%，泥沙平均变化率为 14.97%。模拟结果表明，气候条件对产沙的影响较产流更为明显。因为降雨产生的径流只是影响产沙的其中一个因素，除此之外，气候可能影响到其他因素，如植被的覆盖度、土壤的容重等。

(2) 对比表 6 中的列项，可以看到降雨量不变的情况下，温度与年均径流量和泥沙量呈反向关系；而且温度越高，径流量和泥沙量减小幅度就越大。对比表 6 中的横项，可知温度不变条件下，降雨量与年径流量和泥沙量呈正向关系，但是降雨量越大，径流量和泥沙量增加幅度却变小。降雨量较温度对径流和泥沙的影响更大。这主要是由于降雨对地表的产流量是直接作用，降雨量增大使地表径流也将增大，从而泥沙量也增大。而温度的增加则导致蒸发量增大，所以径流量和泥沙量减小。

## 4 结论

本文以李子溪流域为研究对象，应用 GIS 和 SWAT 模型，对研究区内不同气候及土地利用变化情景下的产流产沙进行了模拟。

(1) 通过分析李子溪流域 1986—2001 年流域土地利用面积变化及土地利用的转移矩阵，揭示了李子溪流域的主要土地利用类型为旱地、水田和林地；1989 年开始实施“长治”工程后，水田、旱地面积持续减少，林地面积持续增加，其中林地增加的面积主要来自于水田和旱地减少的面积。这说明“长治”工程实施后，以退耕还林、植树造林为主的水土流失治理措施取得了一定成效，耕地减少、林地增加这种趋势将会继续下去。

(2) 利用 SWAT 对 1986 年、1999 年、2001 年 3 个时期的土地利用情形进行了产流产沙模拟。结果表明，随着林地覆盖率的增加，径流泥沙都有了不同程度的减少，而且泥沙量减少的幅度大于径流量。这说明植被增多、耕地减少的土地利用变化对流域产流产沙量的减小影响显著，进而反映了退耕还林、植树造林等水保措施对保护水土流失是有效的。

(3) 在 1970—1979 年气象数据和 1986 年土地利用图的基础上，假设了 7 种不同土地利用情景，模拟结果表明，土地利用方式的改变对泥沙的影响较径流的影响更大；在涵养水源和拦截泥沙方面，林地 > 草地 > 耕地；在大于 25° 的坡耕地上实施还林还草措施较在 15°~25° 坡耕地实施还林还草措施对减少地表径流、拦截泥沙的效果更显著。

(4) 以 1986 年土地利用图为基础，对 1970—1979 年的气象资料进行了 9 种假设，对不同气温和

降雨的组合模拟表明，气候的变化对泥沙影响比径流大；年均径流量和泥沙量随降雨量的增大而增大，呈正相关关系；温度与年均径流量和泥沙量呈反向关系；降雨量的变化对径流和泥沙的影响比温度大。

### [参 考 文 献]

- [1] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79-86.
- [2] 张圣微, 雷玉平, 姚琴, 等. 土地覆被和气候变化对拉萨河流域径流量的影响[J]. 水资源保护, 2010, 26(2): 39-44.
- [3] 陈军锋, 张明. 梭磨河流域气候波动和土地覆被变化对径流影响的模拟研究[J]. 地理研究, 2003, 22(1): 73-78.
- [4] 陈引珍, 程金花, 张洪江, 等. 清港河流域土地利用变化对径流的影响[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(4): 38-43.
- [5] 梁小军, 江洪, 朱求安, 等. 岷江上游流域不同土地利用与气候变化的径流响应研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 30-33.
- [6] 陈宁, 赵红莉, 蒋云钟. 汉江上游不同气候情景下土地利用变化对径流的影响研究[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 366-370.
- [7] 李道峰, 田英, 刘昌明. 黄河河源区变换环境下分布式水文模拟[J]. 地理学报, 2004, 59(4): 563-573.
- [8] 梁国付, 丁圣彦. 气候和土地利用变化对径流变化影响研究: 以伊洛河流域伊河上游地区为例[J]. 地理科学, 2012, 32(5): 635-640.
- [9] 贺维. SWAT 模型在晋西黄土区小流域中的应用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [10] 刘卉芳, 曹文洪, 张晓明, 等. 黄土区小流域水沙对降雨及土地利用变化响应研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2): 237-242.
- [11] 陈腊娇. 基于 SWAT 模型的土地利用/覆被变化产流产沙效应模拟[D]. 浙江 金华: 浙江师范大学, 2007.
- [12] 罗巧, 王克林, 王勤学. 基于 SWAT 模型的湘江流域土地利用变化情景的径流模拟研究[J]. 中国环境科学, 2011, 19(6): 1431-1436.
- [13] 庞靖鹏, 刘昌明, 徐宗学. 密云水库流域土地利用变化对产流和产沙的影响[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 290-299.
- [14] 景可. 长江上游泥沙输移比初探[J]. 泥沙研究, 2002(1): 53-59.
- [15] 邓贤贵. 嘉陵江中下游典型流域泥沙流失规律及长治工程效益分析[J]. 水电站设计, 1997, 13(3): 43-50.
- [16] 廖纯艳, 韩凤翔, 冯明汉. 长江上中游水土保持工程建设成效与经验[J]. 人民长江, 2010, 41(13): 16-20.
- [17] 范建容, 柴宗新, 刘淑珍, 等. 基于 RS 和 GIS 的四川省李子溪流域土壤侵蚀动态变化[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 25-28.

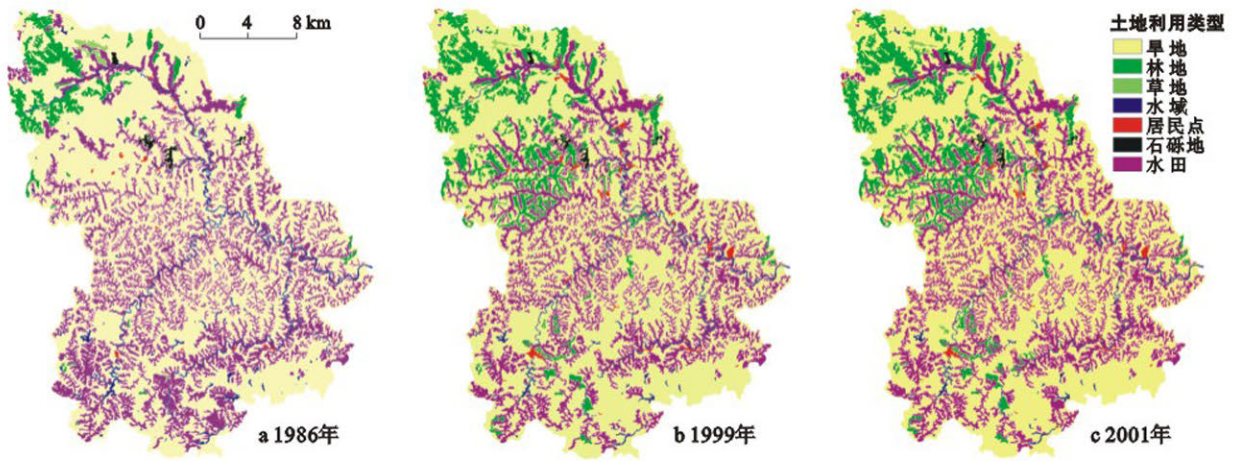
(下转第 90 页)

## [ 参 考 文 献 ]

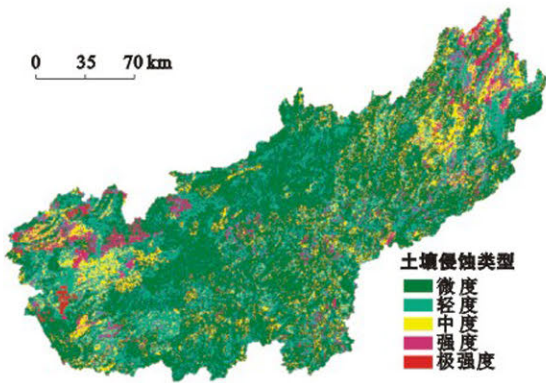
- [1] 郑喜川, 鲁安怀, 高翔, 等. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. 土壤与环境, 2002, 1(1): 79-84.
- [2] 陈怀满. 土壤—植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 13-44.
- [3] 杨元根, Paterson E, Campbell C. 城市土壤中重金属元素的积累及其微生物效应[J]. 环境科学, 2001, 22(3): 44-48.
- [4] Clementer R, Walker D J, Roig A, et al. Heavy metal bioavailability in a soil affected by mineral sulphides contamination following the mine spillage at aznalcollar (Spain) [J]. Biodegradation, 2003, 14(3): 199-205.
- [5] Rajesh K S, Madhoolika A, Fiona M. Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, 66(2): 258-266.
- [6] Abollino O, Aceto M, Malandrino M, et al. Heavy metals in agricultural soils from Piedmont, Italy. Distribution, speciation and chemometric data treatment [J]. Chemosphere, 2002, 49(6): 545-557.
- [7] Esser K B. Reference concentrations for heavy metals in mineral soils, oat and orchard grass (*Dactylis glomerata*) from three agricultural regions in Norway [J]. Water Air Soil Poll., 1996, 89(3/4): 375-397.
- [8] 吴光红, 苏睿先, 李万庆, 等. 大沽排污河污灌区土壤重金属富集特征和来源分析[J]. 环境科学, 2008, 29(6): 1693-1698.
- [9] 解文艳, 樊贵盛, 周怀平, 等. 太原市污灌区土壤重金属污染现状评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8): 1553-1560.
- [10] Munir J, Mohammad R, Sami H, et al. Long-term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters [J]. Desalination, 2007, 215(1/3): 143-152.
- [11] Li Peijun, Wangxin, Allinson G, et al. Risk assessment of heavy metals in soil previously irrigated with industrial wastewater in Shenyang, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161(1): 516-521.
- [12] 李姝娟, 李向东, 郝翠, 等. 污泥堆肥对土壤环境和小麦重金属含量的影响[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(8): 40-44.
- [13] Veeresh H, Tripathy S, Chaudhuri D, et al. Changes in physical and chemical properties of three soil types in India as a result of amendment with fly ash and sewage sludge [J]. Environmental Geology, 2003, 43(5): 513-520.
- [14] Karami M, Afyuni M, Rezaiejad Y, et al. Heavy metal uptake by wheat from a sewage sludge-amended calcareous soil [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 83(1): 51-61.
- [15] 任顺荣, 邵玉翠, 高宝岩, 等. 长期定位施肥对土壤重金属含量的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 96-99.
- [16] 刘景, 吕家珑, 徐明岗, 等. 长期不同施肥对红壤 Cu 和 Cd 含量及活化率的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 914-919.
- [17] 陈碧华, 杨和连, 周俊国, 等. 大棚菜田种植年限对土壤重金属含量及酶活性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 213-218.
- [18] 刘树堂, 赵永厚, 孙玉林, 等. 25 年长期定位施肥对非石灰性潮土重金属状况的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 164-167.
- [19] 陈芳, 董元华, 安琼, 等. 长期肥料定位实验条件下土壤中重金属的含量变化[J]. 土壤, 2005, 37(3): 308-311.
- [20] 徐明岗, 武海雯, 刘景. 长期不同施肥下我国 3 种典型土壤重金属的累积特性[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2319-2324.

(上接第 6 页)

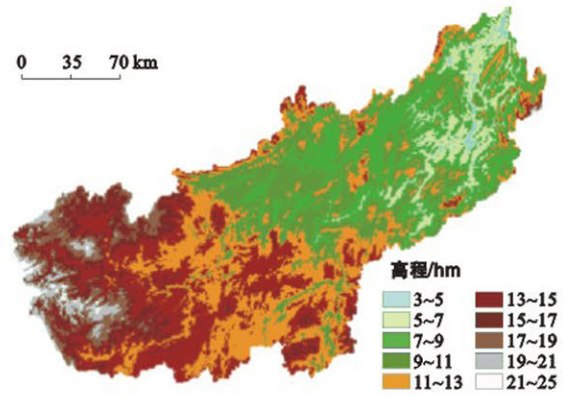
- [18] 邓贤贵, 华国春, 黄川友. 李子河流域泥沙流失规律及工程效益分析[J]. 四川联合大学学报: 工程科学版, 1997, 1(6): 26-35.
- [19] 张荣群, 宋乃平, 王秀妮, 等. 盐渍土时空变化信息的图谱可视化分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 230-235.
- [20] 四川省农牧厅, 四川省土壤普查办公室. 四川土种志 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.
- [21] 王光谦, 王思远, 陈志祥. 黄河流域的土地利用和土地覆盖变化[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(9): 1218.
- [22] 张志强, 王盛萍, 孙阁, 等. 黄土高原吕二沟流域侵蚀产沙对土地利用变化的响应[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1607-1612.
- [23] 陈月红, 余新晓, 谢崇宝. 黄土高原吕二沟流域土地利用及降雨强度对径流泥沙影响初探[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 8-12.
- [24] 刘淑燕, 余新晓, 信忠保, 等. 黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用变化对水沙关系的影响[J]. 地理科学进展, 2010, 29(5): 565-571.
- [25] 郝芳华, 陈利群, 刘昌明, 等. 土地利用变化对产流和产沙的影响分析[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 5-8.
- [26] 绍武, 黄光荣. 中国西部环境演变评估 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.



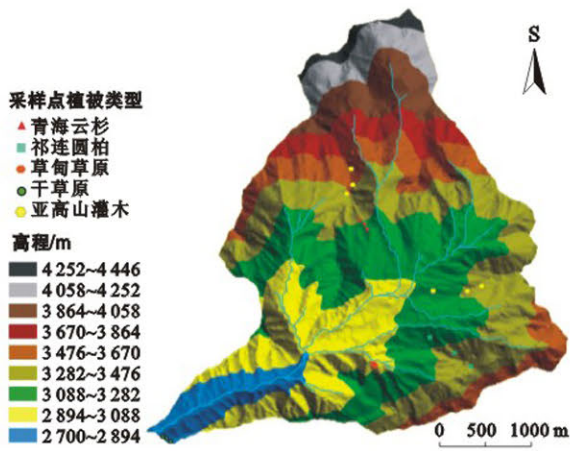
附图1 四川省紫色丘陵区不同时期土地利用类型



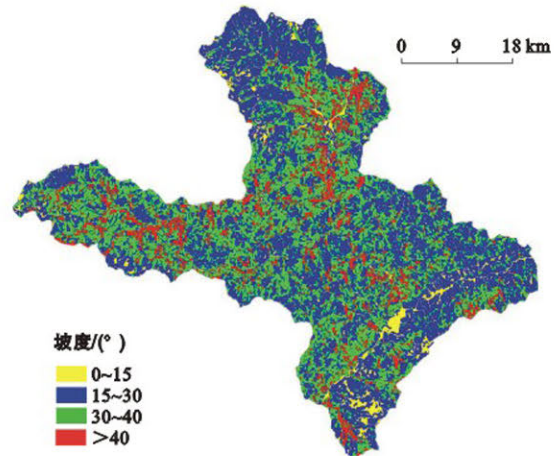
附图2 2000年乌江流域土壤侵蚀类型



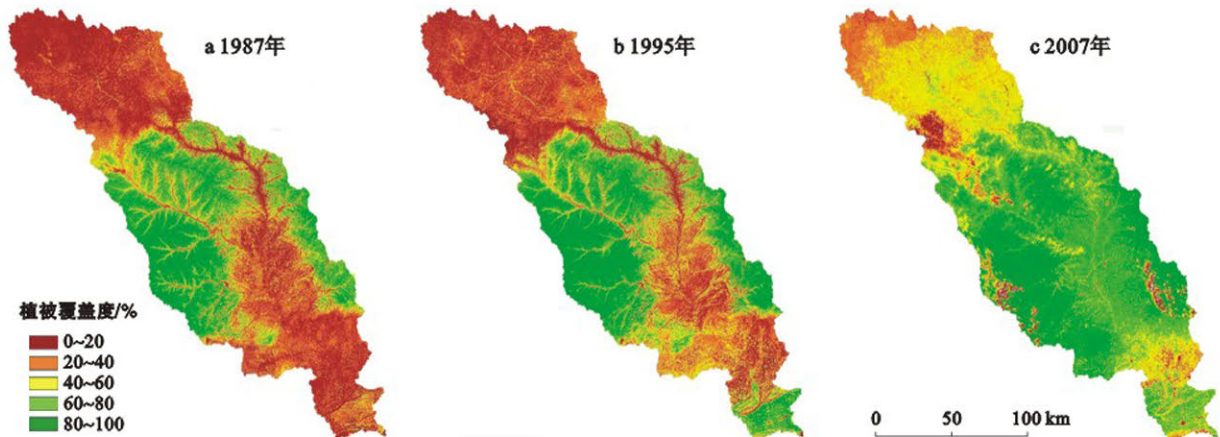
附图3 乌江流域高程等级分布



附图4 采样点在天老池流域中的分布



附图5 四川省茂县坡度分布



附图6 北洛河流域1987,1995和2007年植被覆盖度对比