

侵蚀环境下植被恢复的水文效应分析

——以江西兴国湫水流域为例

乔雪^{1,2,3}, 李硕^{1,2,3}, 陈伊彬^{1,2,3}

(1. 虚拟地理环境教育部重点实验室(南京师范大学), 南京 210023; 2. 江苏省地理环境演化
国家重点实验室培育建设点, 南京 210023; 3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023)

摘要:为探讨植被恢复的水文响应程度,选择江西兴国县湫水河流域为典型区,利用多年径流和泥沙观测数据,通过统计趋势分析和模型模拟手段,对湫水流域长期的水沙变化特征以及植被恢复前后的产水和产沙特征进行了分析。借助 SWAT 水文模型设置 3 种土地利用情景,分析径流量和产沙量对土地利用变化的响应程度。结果表明:1975—2015 年来,土地利用的总体变化趋势是林地面积持续增加,耕地和未利用地面积明显减少;流域内多年平均径流量减少趋势不明显,但植被恢复后产沙量呈现显著下降趋势;植被恢复前后两个时段最大月径流量和产沙量均明显减少。3 种情景年模拟的多年平均径流量变化率不超过 1%,但对产沙量影响较大,尤其是情景年 2015 年比 2002 年的平均泥沙总量减少了 57.6%,最大月产沙量比 2002 年情景年模拟值减少 50%。湫水流域案例表明,以植被恢复为主要手段的小流域治理,在流域水土保持效用上的成效显著,产沙量在 2008 年发生突变说明剧烈侵蚀环境下植被恢复工程真正发挥水土保持作用至少需要 20 年时间。

关键词:植被恢复; SWAT 模型; 径流; 产沙量; 湫水流域

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)05-0136-07

Hydrological Effects of Vegetation Restoration in Eroded Environment

—A Case Study of Lianshui Basin in Jiangxi Xingguo

QIAO Xue^{1,2,3}, LI Shuo^{1,2,3}, CHEN Yichen^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. State Key Laboratory Cultivation Base of Geographical Environment Evolution, Jiangsu Province, Nanjing 210023, China; 3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

Abstract: The Xingguo county of Jiangxi Province has been the key area of soil and water loss control in China because of the severe vegetation destruction and soil erosion since the 1960s. It was not until 1983 that watershed-based vegetation management and restoration were carried out in Xingguo. A case study on the hydrological effects of vegetation restoration was conducted in the Lianshui watershed, which was one of the severely eroded areas of Xingguo. In this study, the responses of water yield and sediment yield to the land use and land cover change in Lianshui watershed between 1975 and 2015 were analyzed by using the remote-sensing images and hydrologic observations. In addition, SWAT model was applied in Lianshui watershed with three scenarios based on the land use conditions in 1993, 2002 and 2015, respectively. The results showed that during the period from 1975 to 2015, the overall trends of land use change in Lianshui watershed presented the moderate increase in forest area and the significant decrease in cropland and unused land area; the sediment yield of this watershed had reduced due to the vegetation restoration which had greatly improved the soil erosion conditions, though the reduction of annual average runoff was not so remarkable; the maximum monthly water yield and sediment yield significantly reduced from 1978—1983 (pre-reforestation) to 1984—2015 (post-reforestation). According to the three scenarios modeled by SWAT, the rate of change in

annual average water yield was not more than 1%, but reforestation had greater impact on the sediment. For example, the annual average sediment yield and the maximum monthly sediment yield in scenario of 2015 decreased by 57.6% and 50%, respectively, compared to those in scenarios of 2002. In conclusion, the case study in Lianshui watershed pointed out that the watershed-based vegetation management and restoration played an important role in soil and water conservation. However, the rapid reduction of sediment yield in 2008 indicated that it took at least 20 years for the vegetation restoration project to really make a difference under intense soil erosion in the watershed.

Keywords: vegetation restoration; SWAT model; water yield; sediment yield; Lianshui watershed

20 世纪 60 年代以来,江西兴国县潯水流域植被破坏严重,地表裸露,沟壑纵横,表层细颗粒土壤流失严重,是我国土壤侵蚀最剧烈的地区之一。1983 年起,兴国县被国家确定为水土流失重点治理区,此后开展了一系列小流域治理活动,包括退耕还林、植树造林以及天然林保护等方面的措施^[1-2]。经过 30 多年的治理,目前潯水流域水土流失状况是否得到明显的改善? 剧烈侵蚀环境下植被恢复呈现什么样的水文响应? 是值得探讨的科学问题。

近年来,国内外学者开展了大量关于植被变化对流域产流和产沙影响的研究工作,主要的研究方法包括“流域对”法、水量平衡法以及模型模拟等方法。“流域对”法对样本流域大小、方位、海拔、局部气候、土壤和植被特征的相似性要求较高^[3],通过“流域对”试验可以探讨连续、不断变化的植被结构和组成对径流的影响^[4]。水量平衡法则是根据研究流域植被变化前后降水、蒸散损失量的改变来确定径流量的变化,邓慧平等^[5]根据流域水量平衡模型和未来气候情景计算水量平衡各分量的可能变化,研究发现在沱江流域当降水变化 $\pm 10\%$,径流量变化在 $\pm 35\%$ 左右。Ge Sun 等^[6]利用 ET 方程对我国不同地理区域造林对年产水量的潜在影响进行评估。模型模拟则是以植被变化前后气象、土地利用、土壤等参数为输入来模拟水量和产沙量的变化,Zuo 等^[7]通过统计检验、水文模拟和土地利用图的综合使用,发现黄土高原土地利用和气候变化均对皇甫川流域产沙量的影响大于产水量。黎云云等^[8]利用 SWAT 水文模型,分析了土地利用变化在年和季的尺度上对渭河流域径流的影响。在地理过程(产水、产沙)对土地利用变化响应研究中,利用校正的过程模型结合情景分析是常用和较为准确的方法。

本文利用美国农业部农业研究所开发的 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型,利用 3 个时段的土地利用情景,通过统计分析和机理过程模型的模拟计算等手段分析 40 a 来潯水流域土地利用变化对流域产流和产沙的影响及数量特征,从而为中国南方丘陵区水土流失的治理和生态恢复与重建工程的效用做出有效评价。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区选择了江西省兴国县东北部的潯水河流域,地理坐标为 $115^{\circ}30'50''$ — $115^{\circ}52'12''$ E, $26^{\circ}18'04''$ — $26^{\circ}36'48''$ N,流域面积为 579.25 km^2 。流域西南低,东北高,高程变化在 $200 \sim 1\,200 \text{ m}$,地形起伏较大,以低山丘陵为主(图 1)。流域内部水系发达,流域出口位于西南的东村水文站所在地。气候类型属亚热带季风性气候,多年平均温度为 18.9°C ,多年平均降水量为 $1\,576.1 \text{ mm}$ 。流域内部植被主要为常绿阔叶林和针叶林,针叶林以马尾松林为主。农田以水稻田为主。土壤类型主要是水稻土和棕红壤,局部有石灰岩土、红壤、黄红壤等。潯水流域在 20 世纪中叶由于植被的破坏,地表裸露,土壤侵蚀严重,一度被称之为中国的“南方沙漠”,1983 年兴国县被列为国家土壤侵蚀治理的重点县,潯水流域作为重点区域开展了原始林保护、退耕还林、植树造林、封山育林等植被恢复为主的治理措施,治理工程迄今已过去 30 余年,该区域地面覆被发生了明显的变化,也为我们研究土地利用变化的水文响应提供了契机。

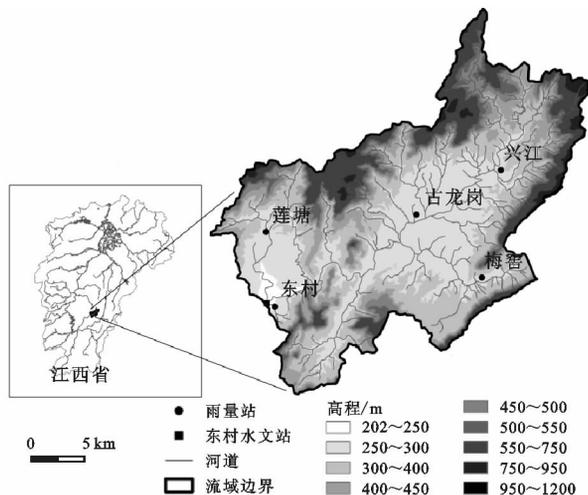


图 1 潯水流域位置

1.2 基础数据的来源及整理

研究中使用的基础地理数据包括地形、土壤、土地利用数据,以及气象、水文数据,其属性和来源如表 1 所示。

表1 激水流域基础数据描述

数据类型	数据说明	数据来源
基础地理数据	数字高程模型(DEM)25×25 格网	1:10 万国家基础地形图基础进行等高线数字化再经矢量一栅格转化生成
	土壤数据	国家第二次土壤普查编绘的1:10 万土壤类型图经人工数字化获得
气象数据	土地利用数据	1993年、2002年由课题组提供,2015年数据利用Landsat8卫星影像进行目视解译,实地调查验证获取
	日最高温,最低温,相对湿度和风速	兴国县气象局的逐日的观测资料
水文观测数据	降水量	东村、莲塘和古龙岗三处雨量站
	逐日径流量、产沙量观测数据	兴国水利局东村水文站

注:气象数据时段为1985—2015年,流量观测值时间段为1978—2015年,泥沙观测值时段为1978—2014年。

1.3 采用的模型及研究方法

整体的研究思路是利用激水流域1993年、2002年、2015年的三期土地利用数据并借助1975年土地利用数据,分析激水流域四十多年来的土地利用变化与数量特征;采用累计距平曲线的统计方法对激水流域多年来水量和含沙量观测数据进行变化趋势分析;以三期土地利用数据分别作为SWAT模型的输入,研究流域内土地利用变化对内产水和产沙的影响程度,从而对激水流域水土保持治理工程的有效性进行评价。

研究中用到的SWAT模型是美国农业部农业研究所开发的连续时段、分布式机理过程模型,具有一定的物理基础^[9-10],模型分布式的参数输入和空间产出结果可同RS和GIS结合,灵活地设置土地利用变

化情景,模拟不同土地利用变化情景下的水文、泥沙和化学径流的响应。SWAT模型在国内外已有较为广泛的应用^[8,11],其建模原理和分布式的应用方法,文中不再赘述。

2 结果与分析

2.1 激水流域土地利用变化遥感制图和分析

1993年、2002年、2015年土地利用均采用国家土地利用现状分类GB/T2010—2007标准,共八大类,按一级类型进行合并,1975年、1993年、2002年和2015年土地利用类型面积统计结果如表2所示。其中1975年土地利用类型面积统计结果参考Shuoli等的研究成果^[12]。

表2 4期土地利用类型面积及面积百分比统计结果

土地利用类型	1975年		1993年		2002年		2015年	
	面积/hm ²	占比/%						
耕地	17606	30.40	12735	21.99	11483	19.83	8104	13.99
林地	27544	47.55	39726	68.59	41228	71.18	46569	80.40
住宅用地	869	1.50	1060	1.83	1141	1.97	2207	3.81
水域及水利设施用地	1645	2.84	637	1.10	643	1.11	499	0.86
其他土地	10257	17.71	3763	6.50	3425	5.91	547	0.94

从表2中可以看出,激水流域主要土地利用类型以林地和耕地为主,除1975年外,其余3期土地利用中二者面积之和占总流域面积的90%以上。1975—1993年,林地面积从27544 hm²增加到39726 hm²,占流域总面积百分比从47.55%到68.59%,面积增加了21.04%。裸地和耕地分别减少了11.21%和8.41%,意味着退耕还林、植树造林工程的开展。住宅用地略有增加(0.33%),池塘水库等水域面积略有减少(1.74%)。1993—2002年、2002—2015年,林地持续保持增加的趋势,两期林地面积百分比分别增加了2.59%和9.22%,表现在裸地和耕地的减少,尤其是2002年后,激水流域在坡地推广了果(橙)、茶(油茶)经济作物的种植,使得耕地面积和裸地减少。总体而言,激水流域植被覆盖率从1975年的47.55%到2015年

的80.4%,面积增加了约32.85%,林地面积大幅度增长,由此带来的水文效应见下节分析。

2.2 激水流域径流量和产沙量时间序列分析

根据现有的径流、泥沙观测数据,1978—2015年降水量、径流量及产沙量时间序列及相应的线性趋势线如图2所示,图中可看出1978—2015年径流量基本平稳,降水量呈微弱上升趋势,产沙量则呈现下降趋势,在95%置信度区间,年产沙量的 p 值^[13]为0.002,呈现出显著减少的趋势。

为了更深入了解径流量和产沙量变化的情况,对多年降水量、径流量和产沙量做累积距平分析^[14],曲线的变化反映了特定时段上升和下降的趋势。图3所示,1978—1984年降水量、径流量累积距平曲线趋势变化小,泥沙曲线则呈上升趋势,意味着这个时段

产沙量增加。1985—1991 年降水量和径流量累积距平曲线呈下降趋势,说明降水量、径流量减少,泥沙曲线趋势变化小,产沙量变化不明显。1991—2002 年累积距平曲线趋势上升,表明该时间段内降水量、径流量和产沙量均增加。2002—2015 年径流量和产沙量累积距平曲线呈下降趋势,说明径流量和产沙量显著减少,降水量曲线趋势变化小,降水量变化幅度小。同时可以看出距平累积值在 2002 年有一个明显的最高点,这与降水量在 2002 年出现极大值有关。由上述分析可知,1978—1984 年降水量和径流量趋于平稳,而产沙量却大幅增加,这与植被砍伐密切相关,可见植被破坏后裸露的地表会加剧土壤侵蚀。1983 年实施治理后,流域产沙量增加的幅度明显减小,说明植被的恢复发挥了减少水土流失的作用。根据 Mann-Kendall(MK)突变点检测^[15]结果显示,产沙量在 2008 年发生突变。2008 年以后,年泥沙总量急剧下降,植被修复工程的环境效用可见一斑。

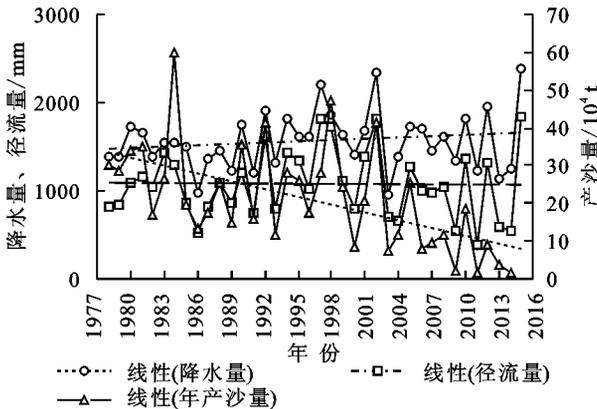


图 2 流域多年实测降水量、径流及产沙量变化

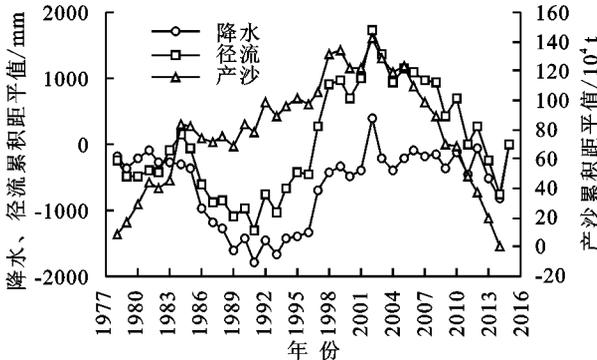


图 3 流域多年降水量、径流量和产沙量累计距平曲线

表 3 植被恢复前后径流量、产沙量多年统计结果

变化量	植被恢复前 (1978—1983 年)	植被恢复后 (1984—2015 年)	变化率/% (变化量)
平均降水量/mm	1518.45	1575.16	3.73(56.71)
平均径流量/mm	1065.53	1080.92	1.44(15.39)
平均径流系数	0.70	0.67	-4.64(-0.03)
平均年产沙量/t	285788.04	195853.81	-31.47(-89934.23)

为了反映流域治理工程对产水、产沙的影响,以流域治理年份开始的 1983 年为节点,划分为植被恢复前(1978—1983 年)和植被恢复后(1984—2015 年)两个时段,分别进行降水量、径流量、径流系数和产沙量的统计分析,见表 3。治理前后年平均降水量增加了 3.73%,年平均径流量和降水量趋势一致但增加幅度较小,仅为 1.44%。但值得指出的是,治理前后的多年平均径流系数从 0.70 变为 0.67,意味着植被增加造成产水量的潜在减少。植被恢复前后年平均产沙量则有了显著的减少,减少比率高达 31.47%。

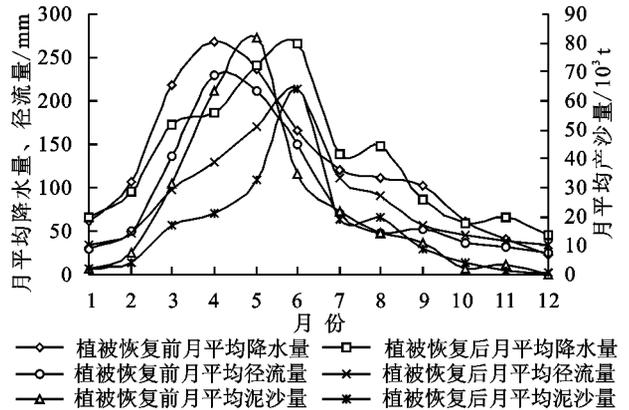


图 4 植被恢复前后各月平均降水量、径流量和产沙量

对植被恢复前后两个研究时段各月平均降水量、径流量和产沙量求平均得到如图 4 所示的两个时段 12 个月的降水、径流和产沙变化情况,图 4 可以看出,植被恢复前后两个时段最大月降水量时间上不一致,1978—1983 年降水量最大月为 4 月,最大月平均降水量约为 268.13 mm;1984—2015 年降水量最大月为 6 月,最大月平均降水量约为 266.56 mm,两个研究段降水最大月相差 1.57 mm。径流最大月时间与各自最大月降水时间一致,两个研究段的最大月径流量却相差 16.51 mm,植被恢复后最大月径流量比植被恢复前最大月径流量减少 7.17%。植被恢复前产沙量最大月份比降水最大月滞后一个月,最大月产沙量为 81 723.62 t,植被恢复后产沙量最大月与降水最大月时间一致,最大月产沙量为 63 932.27 t,植被恢复后最大月产沙量下降 17 791.35 t,减少了 21.77%,可见植被的恢复明显改善了激水流域水土侵蚀状况。

2.3 SWAT 模型模拟分析

为了更好地反映水沙过程对植被覆盖(土地利用)变化的时空响应,在 SWAT 模型校正的基础上,保持其他参数不变,分别以 1993 年、2002 年和 2015 年土地利用数据作为输入数据,进行模拟结果的验证(表 4),本文以 1985 年作为模型预热期,1986—1995 年为模型率定期,以情景年 1993 年土地利用数据为输入进行模拟;1996—2005 年、2006—2015 年为验证期,其对应的土

地利用输入数据分别为情景年 2002 年和 2015 年,分别对研究区内年径流量、产沙总量和月径流量、产沙

量进行模拟,模拟结果选用相关系数 R^2 和 Nash-Sutcliffe 确定性系数 E_{ns} 进行分析评价^[16-17]。

表 4 激水流域 SWAT 模型模拟精度评价

模拟期	径流模拟				产沙量模拟			
	R^2	E_{ns}	实测平均值/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	模拟平均值/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	R^2	E_{ns}	实测 平均值/t	模拟 平均值/t
率定期(年)	0.98	0.95	19.16	20.09	0.85	0.77	228838.76	233090.00
验证期 I(年)	0.91	0.85	22.66	24.54	0.69	0.63	232355.82	251310.00
验证期 II(年)	0.95	0.78	17.69	20.90	0.75	0.63	73664.47	81454.44
率定期(月)	0.91	0.91			0.77	0.72		
验证期 I(月)	0.90	0.88			0.78	0.76		
验证期 II(月)	0.89	0.83			0.77	0.73		

注:率定期为 1986—1995 年,验证期 I 为 1996—2005 年,验证期 II 为 2006—2015 年。

验证期 I 中产沙量的相关系数为 0.69,确定性系数 0.63,与其他两期相比明显精度较低,主要是因为 1998 年中国南方地区发生了严重的洪水灾害,极端偏大的观测值,影响了总体的模拟精度。如果排除掉 1998 年,则验证期 I 的相关系数为 0.91,确定性系数为 0.73。通常认为 E_{ns} 大于 0.50, R^2 大于 0.65 时,模型模拟效果理想^[16],因此模拟结果可进一步应用于分析植被覆盖变化对流域产水产沙的影响。

2.3.1 土地利用变化对流域多年平均径流量和产沙量的影响分析 从表 5 中多年平均径流量可知,1993 年情景下模拟的多年平均径流量最大,2015 年情景下模拟的多年平均径流量最小。由此可以看出,随着林地面积的不断增加,流域多年平均径流量逐渐减少,2002 年情景下相比 1993 年减少了 6.97 mm,2015 年情景下相比 2002 年减少了 10.21 mm。

表 5 林地面积变化与各情景年多年平均径流深和产沙量的关系

情景年	林地面积 百分比/%	多年平均 径流量/mm	变化率/ %	多年平均产 沙量/(10^4 t)	变化率/ %
1993	68.59	1199.43		23.38	
2002	71.18	1192.46	-0.58	22.19	-5.09
2015	80.40	1182.25	-0.86	9.41	-57.6

从 3 种情景模拟的多年平均产沙量可知,激水流域多年平均产沙量总体呈现下降趋势,与多年平均径流量保持一致的变化趋势。但是与多年平均径流量相比,2015 年情景年比 2002 年产沙量减少了 57.60%,减少幅度大,这表明在激水流域土地利用的变化对产沙量的影响更加显著,退耕还林的水土保持措施的减沙率高于减水率。

2.3.2 土地利用变化对流域最大月径流量、产沙量的影响分析 表 6 中对 3 种土地利用情景年下模拟出的最大月径流量和产沙量进行统计和对比分析,从

表中可以看出,最大月径流量和产沙量发生的时间一致,随着植被覆盖率的增加,激水流域在 1993 年、2002 年及 2015 年土地利用情景下模拟出的最大月径流逐渐减少,最大月产沙量也逐渐减少,2015 年情景年下模拟出的最大月产沙量比 1993 年情景年下模拟的产沙量减少将近一倍,可见林地面积增大、裸地面积减少对最大月产沙量的影响是巨大的。

表 6 不同情景年模拟的最大月径流和产沙量对比

情景年	最大月 径流/mm	与 1993 年相比 变化倍数	最大月 产沙量/t	与 1993 年相比 变化倍数
1993	496.46		148700	
2002	483.03	0.97	143100	0.96
2015	470.50	0.95	78130	0.53

2.3.3 典型子流域土地利用变化对产水产沙的影响分析 1993—2015 年期间,激水流域地类之间的转化主要表现为耕地和其他用地(主要是裸地)的减少,林地及住宅用地的增加,增加量以林地面积为主。在空间上,类型之间可能会出现互转的情况,在时间上,类型也可能出现逆转的情况。为了进一步了解产水、产沙的变化是由哪些土地利用类型转变引起的,在子流域中选取地类变化最大的子流域作为典型进行分析,以 1993 年土地利用数据为参考与 2015 年土地利用数据进行对比,选出某一种土地利用类型变化最大的子流域作为典型区。因为住宅用地面积和水域面积的绝对量变化都很小,可忽略不计,因此在选取时只考虑了耕地、林地和其他用地的变化情况,筛选时发现,在 59 个子流域中,没有耕地和裸地面积增加的情况,林地面积虽出现减少的情况,但减少率不超过 0.5%,变化不明显,因此不作为典型进行分析。最终确定了 3 个子流域,对其径流和泥沙的变化情况进行分析,具体见表 7。

表 7 子流域土地利用变化最大的径流与泥沙变化情况

子流域编号	土地利用 变化情况	多年平均径流/mm		变化率/ %	多年平均产沙量/(t·hm ⁻²)		变化率/%
		1993	2015		1993	2015	
50	耕地减少最多	1086.05	1072.47	-1.25	0.93	0.84	-9.53
54	林地增加最多	13.66	12.88	-5.69	306.29	23.99	-92.17
29	裸地减少最多	20.81	19.66	-5.54	22.95	0.48	-97.89

从表 7 中的典型子流域可以看出,30 a 来土地利用变化对子流域的径流量影响较小,但对产沙量的影响较大。土地利用变化对径流量和产沙量的响应程度一致,径流减少时产沙量也对应减少。这说明耕地和裸地面积减少或林地面积增加会导致流域内产水量产沙量减少,因为林地面积增加,植被的蒸腾作用加强,流域内水蒸发速度加快,从而使得径流量减少^[12],径流量减少的同时产沙能力也减小,水中的含沙量随之降低。同时,林地面积不断增加,随着树木的生长,树冠具有的截留功能也增强,降落雨滴的动能减小,且由于森林残落物层的存在^[18-19],使得雨滴对土壤的侵蚀以及水流的搬运能力下降,产沙量减少。

2.3.4 土壤侵蚀强度空间分布特征分析 根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007)中关于南方红壤丘陵区土壤侵蚀分类分级指标,将澱水流域各子流域的土壤侵蚀程度进行分级(表 8)。对模拟的 3 种情景年下各子流域多年平均产沙量进行侵蚀等级划分并制图,见图 5。

表 8 土壤侵蚀强度分类分级标准

侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	侵蚀等级
<200	微度
200~2500	轻度
2500~5000	中度
5000~8000	强度
8000~15000	极强
>15000	剧烈

土壤侵蚀强度变化不大,仅 17 号和 57 号子流域

从 1993 年情景年的中度侵蚀转变成 2002 年情景年的轻度侵蚀,22 号子流域从微度侵蚀转变成轻度侵蚀,55 号子流域从中度侵蚀转变成强烈侵蚀。其中 17,57 号子流域中林地面积均增加了 30%、裸地减少 30%,土壤侵蚀程度降低。55 号子流域裸地面积增加 25%,土壤侵蚀程度增强。在 2015 年情景年下已经没有强烈和剧烈两个侵蚀程度的子流域,大部分子流域都是微度侵蚀,8 个子流域为轻度侵蚀,仅有 1 个子流域为中度侵蚀,主要发生变化是林地面积增加、耕地和裸地面积减少造成的。

3 讨论

从被称为南方沙漠到 80%的土地利用类型都是林地,这归因于 1983 年开始的治理工程,到 20 世纪 90 年代,澱水流域林地面积相比 70 年代已经增加了 45%^[12],这说明植树造林工程的确在植被覆盖率上初有成效,但 1986—2005 年产沙量仅减少 5.09%,而从 2005 到 2015 年林地面积仅增加 11%,但是产沙量却减少 57.6%,这说明植树造林是引起流域产沙量减少的重要因素,但植树造林功效的体现需要一个漫长的过程,随着树木的生长,其郁闭度、叶面积指数增加,树冠对雨滴的减能作用更加明显。从试验结果分析可知,由于植被生长缓慢,真正发挥出生态效益从突变点 2008 年开始,泥沙含量大幅度下降,也就是说,至少需要 20 a 时间植被的恢复工程才发挥其对土壤侵蚀防治的真正作用。

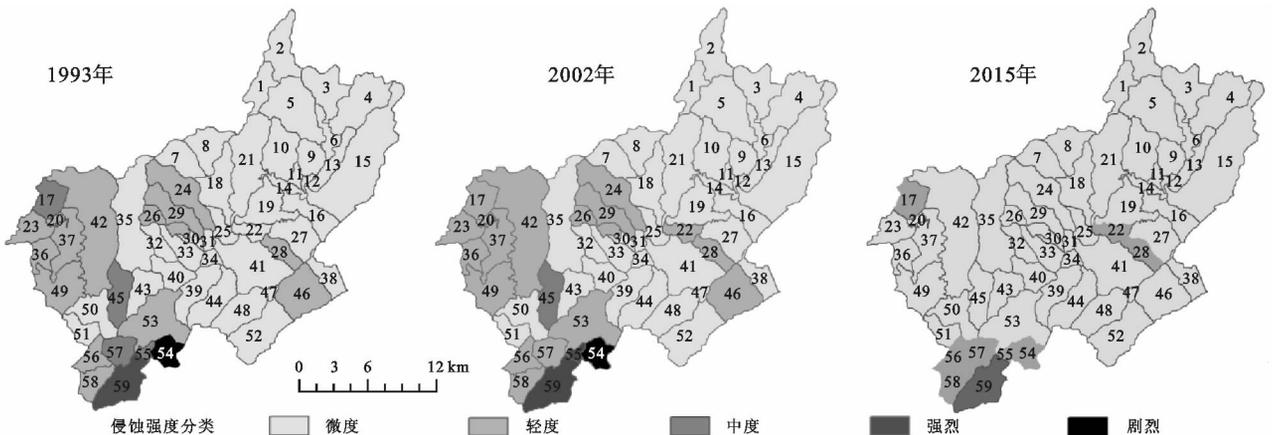


图 5 1993 年,2002 年,2015 年情景年下各子流域土壤侵蚀强度

4 结论

(1) 江西兴国湫水流域土地利用类型主要是林地、耕地和未利用地,1975—2015年,林地面积由 27 544 hm^2 增加到 46 569 hm^2 ,增加了 69%;耕地面积由 17 606 hm^2 减少到 8 104 hm^2 ,减少了 53.9%;未利用地面积由 10 257 hm^2 减少到 591 hm^2 ,减少了 94.6%。

(2) 多年实测平均降水量、径流量均没有显著上升或下降的趋势,多年实测产沙量呈现出显著减少的趋势,且在 2008 年发生突变,产沙量急剧下降。

(3) 植被恢复前后两个研究时段相比,径流量增加了 1.44%(两个时间段内降水量增加了 3.73%的缘故),径流系数由植被恢复前的 0.7 下降到恢复后 0.67,产沙量减少了 31.47%。同时植被恢复前后最大月径流量也减少了 16.51 mm,降低 7.17%,最大月产沙量减少 17 791.35 ton,减少了 21.77%。

(4) 三期土地利用情景模拟下的径流量变化不大,变化率不超过 1%,但是对产沙量的影响较大,尤其是 2002—2015 年,两期土地利用情景下,多年平均产沙量减少了 57.6%。随着三期土地利用中林地面积的不断增长、耕地和裸地面积的减少,模拟的最大月径流量和产沙量也随之减少,2015 年情景年模拟的最大月产沙量比 2002 年情景年模拟值减少 50%。

(5) 植树造林是防治水土流失的重要措施,但是植被功能的发挥需要时间,在湫水流域,从 1983 年开始进行植被恢复的治理工程到泥沙侵蚀量明显减少至少需要 20 a 时间。

参考文献:

- [1] 李硕,刘磊. AnnAGNPS 模型在湫水河流域产水、产沙的模拟评价[J]. 环境科学,2010,31(1):49-57.
- [2] 舒建英,张世熔,孙波,等. 江西兴国水土流失治理区土壤有机质动态变化[J]. 生态学报,2005,25(6):1240-1246.
- [3] 刘昌明,曾燕. 植被变化对产水量影响的研究[J]. 中国水利,2002(10):112-117.
- [4] Yan B, Fang N F, Zhang P C, et al. Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: An assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression [J]. Journal of Hydrology, 2013,484(6):26-37.
- [5] 邓慧平,唐来华. 沱江流域水文对全球气候变化的响应[J]. 地理学报,1998,53(1):42-48.
- [6] Sun G, Zhou G, Zhang Z, et al. Potential water yield reduction due to forestation across China[J]. Journal of Hydrology, 2006,328(3/4):548-558.
- [7] Zuo D, Xu Z, Yao W, et al. Assessing the effects of changes in land use and climate on runoff and sediment yields from a watershed in the Loess Plateau of China[J]. Science of the Total Environment, 2015,544:238-250.
- [8] 黎云云,畅建霞,王义民,等. 渭河流域径流对土地利用变化的时空响应[J]. 农业工程学报,2016,32(15):232-238.46(3):290-299.
- [9] Arnold J G, Fohrer N. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling[J]. Hydro-Logical Processes, 2005,19(3):563-572.
- [10] 王晓朋,乔飞,雷坤,等. SWAT 模型在我国的研究和应用进展[J]. 中国农村水利水电,2015(5):109-113.
- [11] 徐宗学,程磊. 分布式水文模型研究与应用进展[J]. 水利学报,2010,41(9):1009-1017.
- [12] Shuo Li, Xu M, Sun B. Long-term hydrological response to reforestation in a large watershed in south-eastern China [J]. Hydrological Processes, 2013, 28(22):5573-5582.
- [13] 杨刚. 假设检验中的值研究[J]. 河南工程学院学报:自然科学版,2012,24(2):65-67.
- [14] 邱玲花,彭定志,林荷娟,等. 气候变化与人类活动对太湖西苕溪流域水文水资源影响甄别[J]. 水文,2015,35(1):45-50.
- [15] 郭军庭,张志强,王盛萍,等. 气候和土地利用变化对潮河流域产流产沙的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(14):236-243.
- [16] 郝振纯,苏振宽. 土地利用变化对海河流域典型区域的径流影响[J]. 水科学进展,2015,26(4):491-499.
- [17] Tan M L, Ibrahim A L, Yusop Z, et al. Impacts of land-use and climate variability on hydrological components in the Johor River basin, Malaysia[J]. International Association of Scientific Hydrology Bulletin, 2015,60(5):873-889.
- [18] 黄秉维. 森林对环境作用的几个问题[J]. 中国水利,1982(4):31-34.
- [19] 周晓峰,赵惠勋,孙慧珍. 正确评价森林水文效应[J]. 自然资源学报,2001,16(5):420-426.