

基于 SWAT 模型的罗玉沟流域森林植被变化的水文生态响应研究^{*}

谢 媛 媛

(西安铁路职业技术学院, 西安 710014)

摘 要:以甘肃天水罗玉沟流域为研究区,应用分布式水文模型(SWAT)对该流域的径流、泥沙和水质状况进行模拟研究,并重点探讨了降雨和森林植被变化对水文生态响应的影响。结果表明:降雨因子对径流的影响略大于对泥沙的影响;森林植被具有明显的减水减沙生态水文功能,尤其对泥沙的影响更大于对径流的影响。

关键词:水文生态响应;SWAT 模型;森林植被变化;降雨;罗玉沟流域

中图分类号:S715;X171

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2009)04-0197-06

Study on the Ecological Response of Hydrology on Forest Vegetation Change in Luoyu Watershed Based on the SWAT Model

XIE Yuan-yuan

(Xi'an Railway Vocational & Technical Institute, Xi'an 710014, China)

Abstract: This thesis chooses Luoyugou watershed in Gansu province Tianshui city as the example research area, imitating and studying the runoff, sediment and water quality in the research area with the application of distributed hydrological model SWAT(the Soil and Water Assessment Tool), and stressing on the influence of precipitation and forest vegetation change to ecological hydrology responds. The results show that the precipitation influences more to the runoff than sediment; forest vegetation cover have evidence ecological hydrology function of reducing runoff and sediment, especially influences more to the sediment than runoff.

Key words: ecological hydrology response; SWAT model; forest vegetation change; precipitation; Luoyugou watershed

水资源已经是西部地区最具战略意义的资源,水土流失已经成为西部地区的头号环境问题。我国曾进行了许多卓有成效的森林水文学研究,都表明森林植被具有涵养水源、调节径流、改善水质、保护土壤和水环境的巨大水文作用^[7]。因此合理的森林植被生态建设是解决西部水资源水环境问题的重要途径,要充分发挥森林植被的水文生态响应作用,尤其考虑到森林植被对缺水地区的影响,深化对森林植被环境效应的认识,科学而详细地进行林业生态环境建设规划,以保障我国西部地区社会、经济、生态环境的可持续发展。

选取黄土丘陵沟壑区典型流域-罗玉沟流域作为研究单元,采用 SWAT 水文模型结合地理信息系

统原理和手段,研究流域内的森林植被变化与水文生态响应(包括径流、泥沙、水质)的相互关系,其目的是为该区域的生态环境建设和可持续发展提供重要的科学依据。

1 研究流域概况

罗玉沟流域位于东经 105°30' - 105°45', 北纬 34°34' - 34°40'; 属黄河中游黄土丘陵沟壑区第三副区,是渭河一级支流藉河的一条支沟。该流域是黄土丘陵沟壑区第三副区具有一定代表性的流域,1983 年被黄河水利委员会列为试点小流域、被甘肃省列为重点综合治理小流域。

罗玉沟流域呈羽状,总面积为 72.79 km²,流域

^{*} 收稿日期:2008-12-30

基金项目:国家科技部 973 计划(2002CB111502)

作者简介:谢媛媛(1981-),女,硕士研究生,主要从事地理信息系统方向的研究。E-mail:exieyy@163.com

对称系数 0.9,分水岭发展系数 1.49。罗玉沟干沟长 21.81 km,直接注入干沟的大小支毛沟 193 条,其中左岸 96 条,右岸 97 条,中等切沟以上的各级沟道总长 395.35 km,沟壑切割密度 5.43 km/km²。其中,长度 1 km 以上的沟道总长 107.28 km,沟壑密度 1.47 km/km²。干沟平均比降 2.5%。流域的地面坡度,在黄土丘陵沟壑区来说,相对比较平缓,小于 15° 的坡面面积占全流域的 48.4%,大于 25° 的坡面面积占全流域的 23.7%,流域平均坡度为 19°。

罗玉沟流域土壤类型较为复杂,随自然条件和人类生产活动不同而有很大变化,可划分为 3 个土类,8 个土属,11 个土种,大致为山地褐色土类、山地灰褐土类和冲积土类。流域属大陆性季风气候,由于受季风影响,降水的季节分配很不均匀,冬春干旱少雨,秋夏降水集中,虽具有水热同季的特点,有利于农作物的生长,但因各月降水的年际变率大,容易发生旱、涝现象,且夏秋多局地性高强度大雨或暴雨,常导致严重的水土流失,也会给农业生产带来灾害。流域内地表水资源主要是由降水补给,流量的大小与降水的多少密切相关,暴雨之后河水暴涨暴落,常水流量很小,干旱时往往断流,具有季节性沟溪特征。降水和径流的年际变化与月分配趋势非常接近。该流域平均年降水量 531.1 mm,除蒸发渗漏外,地表河川径流总量(包括基流)平均为 582.32 万 m³/a。

2 研究内容与方法

2.1 研究流域空间数据库和属性数据库的构建

在实地踏勘、资料收集与整理的基础上,以 GIS 技术为支持,构建了罗玉沟流域的空间数据库和属性数据库。空间数据库主要包括罗玉沟流域的数字高程模型、土地利用现状图、土壤类型图及雨量站的分布;属性数据库主要包括土壤的物理属性数据和化学属性数据、土地利用现状、植被覆盖的参数和气象数据等。

2.2 分布式水文模型的选取及其适用性评价

根据数据和资料的收集与整理情况,选取 SWAT 模型来研究罗玉沟流域的水文生态响应。SWAT 模型是具有物理基础的、流域尺度的动态模拟模型,模型运行以日为时间单位,但可以进行连续多年的模拟计算。模拟结果可以选择以年、月或日为时间单位输出。模型主要模拟不同的土地利用以及多种农业管理措施对流域的长期影响,不能进行单一事件的、细节模拟。SWAT 模型可以模拟流域内部的多种地理过程,模型由:水文、气象、泥沙、土壤温度、作物生长、养分、农药/杀虫剂和农业管理 8

个组件构成。可以模拟地表径流、入渗、侧流、地下水流、回流、融雪径流、土壤温度、土壤湿度、蒸散发、产沙、输沙、作物生长、养分流失(氮、磷)、流域水质、农药/杀虫剂等多种过程以及多种农业管理措施(耕作、灌溉、施肥、收割、用水调度等)对这些过程的影响。其适用性评价主要表现在参数的敏感度分析、参数的校准、验证以及不确定性分析。

由于数学模型只是对真实世界所作的粗略模拟,模型的敏感参数影响着模拟结果的准确性和可靠性。论文中参数敏感性分析是在对分布式模型进行初步估算率定之后,用该参数值模拟计算研究区某实测年份的径流量和泥沙,对模型中重要的 9 个可调节参数(基流系数、浅层地下水再蒸发系数 REVAPMN、土壤蒸发补偿系数 ESCO、坡长因子 SLSUBBSN、坡度因子 SLOPE、径流曲线数 CN2、土壤可利用水量 SOL_AWC、农作物管理因子 CUSLE 和氮元素 NPERCO)进行敏感性检验;检验方法采用 LH-OAT,检验输出值为流量、泥沙量等 4 个输出结果,以确定该地区最敏感的影响参数。

不同的径流成份对于泥沙和水质产生的作用有很大不同,在进行流域径流模拟时,不仅应考虑总径流量的拟合,而且对径流机制模拟的正确与否也应予以关注,以保障流域径流模拟的有效性。在参数敏感度分析的基础上,运用实测径流数据,采用 SCE-UA 方法进行模型的精确校准及不确定性分析,并用该研究区的实测数据进行验证。研究选用 1986 - 2000 年河道流量对径流、泥沙和水质进行参数率定。通过调整参数使径流模拟值与实测值吻合,要求模拟值与实测值年均误差应小于实测值的 15%,月均值的线性回归系数 $R^2 > 0.6$,且 $Ens > 0.5$ 。详见表 1。经过参数敏感性检验、参数的校准和验证后,最终确定模型内部分重要参数的取值。

表 1 模拟结果评价

变量	月均值		Re/ %	R ² / %	Ens/ %
	实测值	模拟值			
校准期	0.43	0.49	14.0	96.1	0.89
验证期	0.34	0.37	8.8	91.5	0.82

2.3 基于分布式水文模型的水文生态响应分析与预测

土地利用类型和降雨的时空分布是影响水文的主要因素之一。不同的土地利用有着不同的水文特性,这不仅与其自身特性有关,而且与土地利用在流域内的空间分布特征相关,每种土地利用往往与地形或土壤类型相联系。将针对研究流域内不同土地利用类型,分析其单位面积水文生态响应情况,同时

还将设计不同强度、时间分布的降雨,模拟研究在相同土地利用状况下水文响应情况,以及在相同的降雨条件下,不同的森林植被覆盖率以及不同的水土保持措施条件下的水文生态响应情况。

3 基于 SWAT 模型的水文生态响应模拟

3.1 模拟结果的年内统计分析

2000 年的降雨量较多,略高于平水年,降雨主要集中在 8 月和 9 月,分别为 132.91 mm 和 101.34 mm,这两个月的降雨量之和占到了全年降雨量的 42.5%,降雨最少的时间出现在 12 月,为 7.68 mm。2000 年罗玉沟流域的总径流量为 342.09 万 m³,产生泥沙 277 435.20 t,随着水土流失的有机氮为 19 184.04 kg,有机磷为 76 452.79 kg。

3.2 不同土地利用的模拟结果分析

2000 年的土地利用类型以梯田为主,为

3 689.00 hm²,占总面积的 53.5%,其次为有林地,面积为 1 792.00 hm²,占总面积的 26%。不同的土地利用类型上,以梯田的产水量最大,为 179.49 万 m³,占总百分比的 2.5%,产生泥沙 159 918.15 t,占到了总泥沙量的 57.6%,流失有机氮 11 435.9 kg,占有有机氮总流失量的 59.6%,流失有机磷 41 058.57 kg,占有有机磷流失总量的 53.7%。其次为有林地,产水量为 90.96 万 m³,占总产水量的 26.6%,而有林地产生的泥沙含量和流失的有机氮含量都低于了坡耕地。

4 基于 SWAT 模型的流域水文生态响应预测

为了更好的研究不同的降雨变化和土地利用变化对水文生态响应的影响,还利用 SWAT 模型建立起不同的情景模拟,以便对罗玉沟流域的水文生态响应进行预测性研究。

表 2 2000 年模拟结果月统计

月份	降雨量/mm	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	径流量/万 m ³	泥沙量/t	有机氮/kg	有机磷/kg
1	10.08	0.06	0.61	499.38	34.53	137.62
2	13.75	0.08	6.53	5326.76	368.33	1467.89
3	39.11	0.34	23.52	19170.77	1325.62	5282.89
4	19.31	0.21	13.17	10736.74	742.42	2958.72
5	34.29	0.30	21.13	17228.73	1191.33	4747.72
6	76.45	0.84	34.92	27022.19	1968.53	7446.50
7	15.79	0.10	10.69	8711.47	602.38	2400.62
8	132.91	1.50	102.10	83230.56	5755.21	22935.84
9	101.34	1.15	86.07	70163.36	4851.64	19334.91
10	79.13	0.88	26.37	21501.23	1486.76	5925.09
11	20.75	0.15	9.50	7740.44	535.24	2133.03
12	7.68	0.03	7.49	6103.57	422.05	1681.96
总计	550.59		342.09	277435.20	19184.04	76452.79

表 3 2000 年不同土地利用条件下的流量、泥沙、养分流失统计

土地利用	面积/hm ²	产水量/万 m ³	百分比/%	泥沙量/t	百分比/%	有机氮/kg	百分比/%	有机磷/kg	百分比/%
梯田	3689.00	179.49	0.525	159918.15	0.576	11435.90	0.596	41058.57	0.537
坡耕地	644.60	33.88	0.099	50852.49	0.183	3816.03	0.199	11886.42	0.155
有林地	1792.00	90.96	0.266	47004.16	0.169	2490.88	0.130	16934.40	0.222
灌木林	208.90	10.58	0.031	4733.67	0.017	350.95	0.018	1813.25	0.024
草地	562.00	27.19	0.079	14926.72	0.054	1090.28	0.057	4760.14	0.062
总计	6896.50	342.09	1.000	277435.20	1.000	19184.04	1.000	76452.79	1.000

4.1 不同降水条件下的水文模拟

还选取了该流域 3 期具有代表性的不同的降雨水平下的降雨资料来模拟相同土地利用状况下的产

流和产沙等情况,以分析降雨对水文变化的影响。3 期降雨分别为枯水年(年总降雨量 364.83 mm),平

水年(年总降雨量 516.22 mm)和丰水年(年总降雨量 782.81 mm),土地利用数据选用了 2000 年土地利用资料。为了研究方便和结果的可比较,3 次模

拟的降雨资料以实测资料为基础,在不改变降雨总量的前提下,人工调整了降雨的年内分布,使得这 3 期降雨具有类似的年内分布特征。

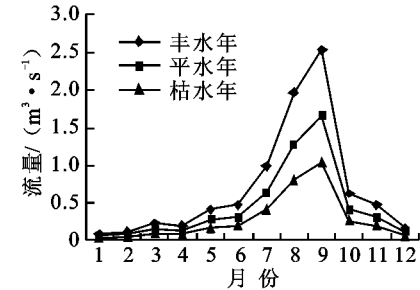


图 1 不同降雨水平下的平均流量变化

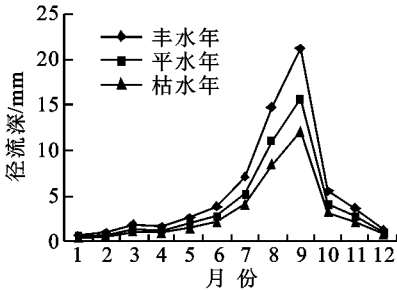


图 2 不同降雨水平下的径流深变化

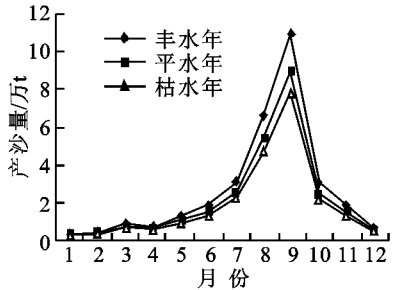


图 3 不同降雨水平下的产沙量变化

表 4 不同降雨水平下的流量、径流量、泥沙量变化统计

项 目	丰水年	平水年	减少率/ %	枯水年	减少率/ %
降雨量/ mm	782.81	516.22	34.1	364.83	53.4
流量/ (m ³ · s ⁻¹)	0.69	0.45	34.8	0.29	58.0
径流量/ mm	65	48	26.1	37	39.4
泥沙量/ t	316542	259876	17.9	225436	28.8

模拟结果表明,在相同的土地利用状况下,流量、径流量、泥沙量都是随着降雨量的减少而减少,图 1 反映了不同降雨水平下的流量变化情况,丰水年流量最大,达到 0.69 m³/s,平水年为 0.45 m³/s,枯水年最小,为 0.29 m³/s;图 2 反映了不同降雨水平下的径流量变化情况,丰水年、平水年、枯水年时期的径流量分别为 65,48,37 mm;图 3 反映了不同降雨水平下的泥沙量变化情况,丰水年产生泥沙 316 542 t,平水年产生泥沙 259 876 t,枯水年产生

的泥沙为 225 436t,从表 4 统计分析中可以得出,当降雨量减少 34.1 %时,平均流量、径流量、泥沙量分别减少 34.8 %,26.1 %,17.9 %,当降雨量减少了 53.4 %时,流量、径流量、泥沙量分别减少 58.0 %,39.4 %,28.8 %,可见,在降雨量变化相同的情况下,流量和径流量的变化幅度略大于泥沙量,因此可以得出,罗玉沟流域降雨因子对径流的影响要略大于对泥沙的影响。

4.2 不同森林植被覆盖下的水文模拟

为了具体研究罗玉沟流域内森林植被变化对水文变化的影响,这一节分别模拟了在相同的降雨状况但是在不同的林地覆盖率下的水文响应情况。降雨数据采用了多年平均降雨量,分别设立了林地覆盖率 100 %、80 %、50 %、20 %和全流域无林地 5 种情景模式。

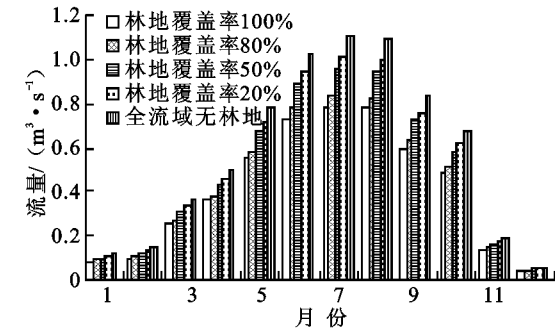


图 4 不同森林植被覆盖下的流量

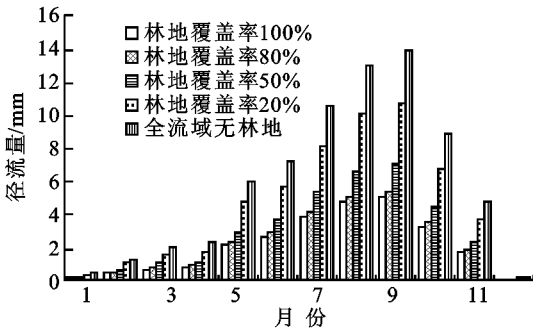


图 5 不同森林植被覆盖下的径流量

表 5 不同森林植被覆盖下的流量、径流量、泥沙量变化统计

项 目	全流域无林地	林地覆盖率 20 %	减少率/ %	林地覆盖率 50 %	减少率/ %	林地覆盖率 80 %	减少率/ %	林地覆盖率 100 %	减少率/ %
流量/ (m ³ · s ⁻¹)	0.57	0.52	8.8	0.50	12.3	0.43	24.6	0.41	28.1
径流量/ mm	71	55	22.6	36	49.5	28	60.8	26	63.9
泥沙量/ t	548675	310354	43.4	156750	71.4	58963	89.3	16895	96.9

模拟结果表明,流量、径流量、泥沙量都是随着植被覆盖率的增加而减少,图 4 反映了不同森林植被覆盖下的流量变化情况,流域内无林地时流量为

0.57 m³/s,林地覆盖率为 20 %时流量为 0.52 m³/s,林地覆盖率为 50 %时流量为 0.50 m³/s,林地覆盖率达到 80 %时流量为 0.43 m³/s,当林地覆盖

率达到 100 % 时流量为 $0.41\text{ m}^3/\text{s}$; 图 5 反映了不同森林植被覆盖下的径流量变化情况, 流域内无林地时径流量达到 71 mm , 林地覆盖率为 20 % 时径流量为 55 mm , 林地覆盖率为 50 % 时径流量为 36 mm , 林地覆盖率达到 80 % 时径流量为 28 mm , 当林地覆盖率达到 100 % 时径流量仅为 26 mm ; 图 6 反映了不同森林植被覆盖下的泥沙量变化情况, 流域内无林地时产生泥沙量达到 $548\ 675\text{ t}$, 林地覆盖率为 20 % 时泥沙量为 $310\ 354\text{ t}$, 林地覆盖率为 50 % 时泥沙量为 $156\ 750\text{ t}$, 林地覆盖率达到 80 % 时泥沙量为 $58\ 963\text{ t}$, 当林地覆盖率达到 100 % 时泥沙量仅为 $16\ 895\text{ t}$; 从表 5 统计分析中可以得出, 当林地覆盖率分别增加 20 %、50 %、80 %、100 % 时, 流量分别减少了 8.8 %、12.3 %、24.6 %、28.1 %, 径流量分别减少了 22.6 %、49.5 %、60.8 %、63.9 %, 泥沙量分别减少了 43.4 %、71.4 %、89.3 %、96.9 %, 可见, 森林植被很明显的减水减沙的生态水文功能, 尤其对被具

有泥沙的影响更大于对径流的影响, 在森林植被增加相同时, 泥沙的减少幅度远大于径流的减少幅度。因此可以得出, 罗玉沟流域内森林植被因子对泥沙的影响要大于对径流的影响。

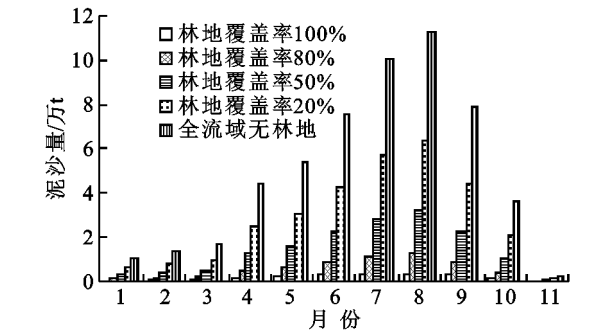


图 6 不同森林植被覆盖下的泥沙量

4.3 耕地水土保持措施下的水文模拟

由于罗玉沟流域内主要的土地利用类型还是耕地为主, 分别设立了无水保措施、等高耕作和等高带状耕作 3 种情景模式, 分析结果如下:

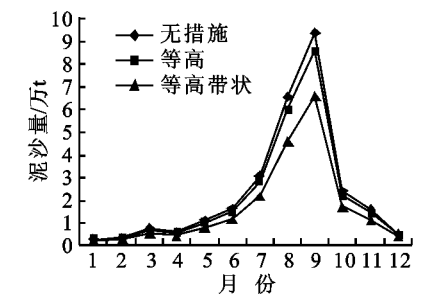
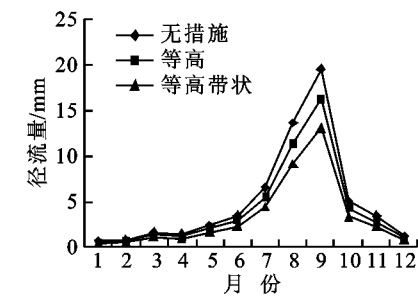
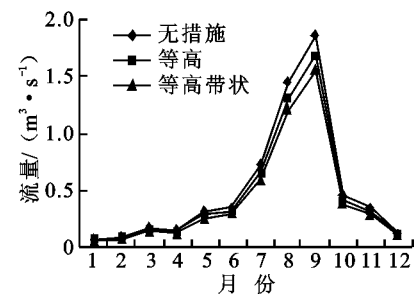


图 7 不同耕地水土保持措施下的流量变化 图 8 不同耕地水土保持措施下的径流量变化 图 9 不同耕地水土保持措施下的泥沙量变化
表 6 不同耕地水土保持措施下的流量、径流量、泥沙量变化统计表

项目	无措施	等高耕作	减少率/ %	等高带状耕作	减少率/ %
流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.51	0.46	9.8	0.42	17.6
径流量/ mm	59	50	15.3	48	18.6
泥沙量/ t	287963	263208	8.6	201578	30.0

模拟结果表明, 水土保持措施会带来流量、径流量和泥沙量的减少。图 7 反映了在不同耕地水土保持措施下的流量变化情况, 在无措施情况下, 流域内流量为 $0.51\text{ m}^3/\text{s}$, 在等高耕作情况下流量为 $0.46\text{ m}^3/\text{s}$, 在等高带状耕作条件下流量为 $0.42\text{ m}^3/\text{s}$; 图 8 反映了在不同耕地水土保持措施下的径流量变化情况, 在无措施情况下, 流域内径流量为 59 mm , 在等高耕作情况下径流量为 50 mm , 在等高带状耕作条件下径流量为 48 mm ; 图 9 反映了在不同耕地水土保持措施下的泥沙量变化情况, 在无措施情况下, 流域内产生泥沙 $287\ 963\text{ t}$, 在等高耕作情况下产生泥沙 $263\ 208\text{ t}$, 在等高带状耕作条件下产生泥沙 $201\ 578\text{ t}$; 从表 6 的统计分析中可以看出, 当采用了等高耕作的方式后, 流量减少了 9.8 %, 径流量减少了

15.3 %, 泥沙量减少了 8.6 %, 当采用了等高带状耕作的方式后, 流量分别减少了 17.6 %, 径流量减少了 18.6 %, 泥沙量减少了 30.0 %, 虽然水土保持措施利用所引起的径流和泥沙的变化不及变化降雨状况和变化植被覆盖度时那样明显, 可是由于罗玉沟流域属于一个有人居和耕作的流域, 因此水土保持措施对于此流域减水减沙更具有实践意义, 便于在生产中投入使用。

5 结论与讨论

5.1 结论

(1) 在 GIS 技术的支持下建立了研究流域的基础空间数据库和属性数据库, 实现了分布式水文模型 SWAT 对西部干旱区中小流域的水文生态响应

模拟研究。

(2) 基于 SWAT 模型的模拟分析结果表明,降雨和土地利用变化对径流、泥沙和水质都产生了较大的影响。年内降雨较多的月份,产生的径流和泥沙量也较大,反之年内降雨量较少的月份,产生的径流和泥沙量也较小。森林植被的增加则直接导致径流量的减少、泥沙量的减少和养分流失的减少。

(3) 通过建立情景模型,针对不同降雨水平、不同的森林植被覆盖和不同的水土保持措施对水文响应的影响进行了情景分析。结果表明:降雨因子对径流的影响略大于对泥沙的影响;森林植被具有很明显的减水减沙的生态水文功能,尤其对泥沙的影响更大于对径流的影响;水土保持措施的利用所带来的水文变化则不及降雨和植被覆盖对其的影响。

5.2 讨论

(1) 由于数据限制,部分参数难于查找,对最终模拟结果的精度有一定的影响。

(2) 对于参数众多的分布式水文模型而言,参数校准过程耗时甚多,因此开发更优化的自动参数优化程序,是今后分布式水文模型参数率定方法研究的方向之一。

(3) 论文在进行实验流域水文响应情景模拟时,仅设立了耕作方式的水保措施,尚需进行更为细致深入的情景分析,以寻求更好的水保措施建设。

参考文献:

- [1] 郭生练,熊立华. 分布式流域水文物理模型的研究现状与进展[M]//刘昌明. 黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理研究和进展, 郑州:黄河水利出版社, 2001:51-57.
 - [2] 郭生练,熊立华,杨井,等. 基于 DEM 的分布式流域水文物理模型[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(6): 1-5.
 - [3] 郝芳华. 流域非点源污染分布式模拟研究[D]. 北京:北京林业大学, 2003.
 - [4] 侯喜禄. 陕北黄土丘陵沟壑区植被减沙效益研究[J]. 水土保持通报, 1990, 10(2): 33-40.
 - [5] 万洪涛,周成虎,万庆,等. 地理信息系统与水文模型集成研究述评[J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 560-568.
 - [6] 吴东国. 密云水库流域土地利用变化水文响应初步研究[D]. 北京:北京林业大学, 2003.
 - [7] 余新晓,程根伟,赵玉涛,等. 森林流域分布式水文模型研究[J]. 中国水土保持科学, 2003, 3(1): 35-40.
-
- (上接第 196 页)
- [8] 丁晓雯,沈珍瑶,刘瑞民. 基于水文水质资料的非点源输出系数模型参数确定方法及其应用[J]. 北京师范大学学报, 2006, 42(5): 534-538.
 - [9] Worrall F, Burt T P. The impact of land-use change on water quality at the catchment scale: the use of export coefficient and structural models [J]. J. Hydrol. 1999, 221: 75-79.
 - [10] Johns P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modeling approach [J]. J. Hydrol. 1996, 183: 323-349.
 - [11] Johns P J, O'Sullivan P E. The natural history of Slapton Ley Nature Research : Nitrogen and phosphorus losses from the catchment-an export coefficient approach [J]. Field Studies, 1989, 7: 285-309.
 - [12] Johns P J. An investigation of the effects of land use upon water quality in the windrush catchment [D]. Oxford: Uni. Oxford, 1990.
 - [13] Heathwaite A L, Burt T P, Trudgill S T. The effect of land use on nitrogen, phosphorus and suspended sediment delivery to streams in a small catchment in Southwest England [C]//Thornes J B. Vegetation and Erosion: Processes and Environments, Wiley: Chichester, 1990: 161-178.
 - [14] 丁晓雯,沈珍瑶,刘瑞民. 长江上游非点源氮素负荷时空变化特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 836-841.
 - [15] 刘瑞民,杨志峰,丁晓雯,等. 土地利用/覆盖变化对长江上游非点源污染影响研究[J]. 环境科学, 2006, 27(12): 2408-2414.
 - [16] 辽宁统计局. 2001 年辽宁省统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2001.
 - [17] 内蒙古统计局. 2001 年内蒙古统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2001.
 - [18] 王波,张天柱. 辽河流域非点源污染负荷估算[J]. 重庆环境科学, 2003, 12(25): 132-135.
 - [19] 杨海军,沈波. 东北黑土区水土流失研究与治理[M]. 长春:吉林科学技术出版社, 2005.
 - [20] 沈万斌,杨育红,金国华. 吉林省农业非点源氮氮污染环境影响评价[J]. 云南农业大学学报, 2007, 22(4): 574-576.
 - [21] Jonathan D K, Richard E H. An information-theoretical analysis of budget-constrained nonpoint source pollution control [J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2003, 46: 106-130.