DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2016.02.10

淮河上游流域土地利用变化对 次暴雨产沙影响研究

闫方秀^{1a,1b},周恺^{1c},李琼芳^{1a,1b},马俊超^{1a,1b},鞠彬²
(1.河海大学 a.水文水资源学院; b.国际河流研究所; c.环境学院,江苏南京 210098;
2.中国电建集团 华东勘测设计研究院有限公司,浙江杭州 310014)

摘 要: 土地利用变化既改变水文循环过程也改变产沙过程。本文以淮河上游大坡岭以上流域为研究区,基于 1990s 和 2000s 的土地利用资料和两个年代各 10 场暴雨对应的水文与气象资料,以 0.5 h 为时间步长,应用改进的 水沙模型模拟流域暴雨产沙,分析土地利用变化对次暴雨 – 泥沙负荷关系的影响;基于两个年代获得的模型参数, 模拟 1990s 十场暴雨的产沙过程,分析相同暴雨条件下土地利用模式变化对产沙的影响。结果表明:模拟结果满足 精度要求;土地利用变化改变了降雨 – 泥沙负荷关系,1990s 到 2000s 的土地利用变化减轻了流域水土流失,导致 次暴雨产沙量、沙峰及侵蚀模数均减少。研究成果可为淮河流域水土治理提供科学依据,丰富并创新湿润半湿润 地区水土流失模拟理论与方法。

Research on the impacts of land use change on single storm sediment yield characteristics of the upper Huaihe Basin

YAN Fangxiu^{1a,1b}, ZHOU Kai^{1c}, LI Qiongfang^{1a,1b}, MA Junchao^{1a,1b}, JU Bin²

(1. a. College of Hydrology and Water Resources; b. Center for International River Research; c. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Power China Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The change of land use alters not only hydrological cycle but also sediment yield process. The paper took the basin above Dapoling hydrological station in the upper reaches of Huaihe river as the study area. Based on data of land – use, and data of corresponding hydrology and meteorology in each 10 rainstorm in 1990s and 2000s, it modified the water – sediment model to simulate the sediment delivery process of Dapoling station with 0.5 hour as time scale and analyzed the impact of land use change on the relationship between rainfall and sediment load. Based on the parameters gotten in 1990s and 2000s, the paper simulated, sediment delivery process of 10 storms so as to analyze the impact of land use change on sediment yield. The results indicated that the simulated results meet precision demand. The land use pattern changed the relationship between rainfall and sediment load. The change of land use from 1990s to 2000s mitigated the soil erosion of watershed, and resulted in the decrease of sediment load, peak and Erosion modulus. The results can provide the scientific reference for the water and soil conservation of Huaihe basin, rich and innovate the theory and method of water and soil loss simulation in humid and semi – humid region.

Key words: model of distributed sediment load; change of land use pattern; sediment yield simulation; upperstream of Huaihe basin

收稿日期:2015-11-27; 修回日期:2016-01-06

作者简介:闫方秀(1991-),女,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为水文预报。

通讯作者:李琼芳(1966-),女,湖北武汉人,教授,博士生导师,主要从事水文学及水资源研究。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41171220);长江学者和创新团队发展计划资助(IRT13062);江苏省"世界水 谷"与水生态文明协同创新中心(B08048);水安全与水科学协同创新中心

1 研究背景

56

随着人口的急剧增加和社会经济的快速发展,人 类正以空前的速度和规模改变着自身赖以生存的地 球环境,导致影响流域产汇流的土地利用/土地覆盖 等下垫面条件发生显著变化。刘昌明等^[1],冯平^[2]研 究了土地利用/土地覆盖变化影响不同界面(陆面 -大气、陆面-地下水、地表水-地下水等)的水分交换 量,进而影响流域蒸散发、下渗、地表水、土壤水和地 下水过程及地表水、十壤水和地下水相互转化机制 (Caitao^[3], Wang Guoqing 等^[4])以及以水为载体的 产沙和产污过程(庞靖鹏等^[5])。因此,产水、产沙过 程对土地利用变化响应一直是水文领域的研究热点。 郝芳华等[6]在黄河支流洛河上游流域分析土地利用 变化对产水、产沙的影响,结果表明森林可减少产沙 量,农业用地的增加将会增加产沙量。Cai Tao 等^[7] 应用 SWAT 模型分析淮河流域不同土地利用类型产 沙,得出林地侵蚀模数最小。郭军庭等^[8]在密云水库 以上潮河流域研究产沙对土地利用变化的响应,结果 显示得益于退耕及生态修复,流域产沙量显著下降。 上述学者的研究多以日为时间步长,而土地利用变化 对次洪产沙特性影响的研究还不多见。考虑到湿润 半湿润地区年土壤侵蚀量很大程度上取决于次暴雨 引发的土壤侵蚀,因此模拟分析流域土地利用变化对 次洪产沙特性的影响既必要又迫切。论文选取土地 利用发生了显著变化、水土流失较严重的淮河(胡续 礼等^[9])大坡岭以上流域为研究区,基于 1990s 和 2000s 两期土地利用,通过集成改进的新安江模型^[10] 和土壤侵蚀模型,建立研究区水沙模型^[11]模拟分析 次洪产沙对土地利用模式变化的响应。

2 研究方法

根据王珂清等^[12]的研究,淮河流域在过去 50 多年内降水特性未发生显著变化,即降雨产沙关系 的变化主要由下垫面条件变化引起,而下垫面变化 主要体现在土地利用的变化。论文选取淮河上游大 坡岭以上流域,基于能反映研究区 1990s 和 2000s 土地利用、分辨率为 1km 的遥感资料,分析了研究 区从 1990s 到 2000s 土地利用模式的变化;从 1990s 和 2000s 分别选取汛期 10 场降雨,以 0.5h 为时间 步长,通过集成新安江模型与邹宏荣等^[11]建立的研 究区产汇沙模型模拟暴雨产沙过程,分别获得两个 年代不同土地利用模式下的模型参数;基于两个年 代的模拟成果分析土地利用模式变化对降雨 – 泥沙 负荷关系的影响;基于 1990s 的 10 场暴雨和两个年 代的模型参数,模拟 10 场暴雨对应的产沙过程,分 析相同降雨条件下土地利用模式变化对次洪产沙特 性的影响。

3 暴雨产沙模拟

本次流域暴雨产沙模拟采用改进的分布式水沙 模型,其以改进的新安江模型为产沙提供径流输入 对产汇沙模型进行了改进。改进的新安江模型采用 双源蒸散发模型计算流域蒸散发能力^[10],以0.5h 为时间步长,以1km×1km网格作为计算单元实现 研究流域产汇流的时空过程模拟。产汇沙模型包括 坡面产沙、坡面汇沙与沟道产沙、沟道汇沙四个模 块,模型参数主要包括坡面抗侵蚀能力、沟道平均产 沙浓度、关系式系数、坡面平均汇沙时间、沟道泥沙 传播时间^[11]。

将新安江模型计算得到的流量作为产汇沙模型 中泥沙运动的驱动项实现流域产沙模拟。

3.1 研究区概况

淮河上游大坡岭以上流域,面积1631.22 km², 范围东经113.27°~113.82°,北纬32.22°~32.71°。 流域地处我国南北气候过渡带,属暖温带半湿润季 风气候区,大坡岭水文站多年平均降水量接近1000 mm,且50%集中在汛期(6-9月)。流域内以山区 和丘陵为主,植被较好,土地利用类型以农林业为 主。流域内1990s至2000s农业用地由水田更替为 旱地。流域内共有13个雨量站、4个气象站、1个辐 射站、1个水文站,无水库,见图1。



3.2 研究区土地利用变化分析

近几十年来,淮河流域内随着上游区域人口急 增,资源需求也随之加大,人类活动对地表扰动强 烈,引起区域内土地利用的变化。流域内 1990s 农 业用地以水田为主,占流域面积的 47.9%,林地和 灌木林占流域一半以上面积。到 2000s,水田所在 区域的耕地转变为旱地,流域主要农业用地由水田 更替为旱地,占 47.6%,部分地区灌木林发展为林 地,城市用地有所增加,见表1。

表1 研究区 1990s 到 2000s 土地利用模式变化统计表

白	F代	旱地	水田	森林	灌木丛	草地	水域	未利用地
19	990s	0.1	47.9	31.3	19.9	0.1	0.5	0.2
20)00s	47.6	0.2	47.6	3.4	0.2	0.6	0.4

3.3 数据资料

数据资料包括:地形、土地利用、水文等。对数 据进行如下处理:基于流域数字高程图 DEM,运用 ArcGIS 软件数字化流域。根据淮河大坡岭以上流 域 1990s、2000s 的土地利用资料,应用 ArcGIS 确定 土地利用空间分布及面积比例。汛期水文资料,雨 量资料为大坡岭流域13 个雨量站的实测资料,采用 反距离平方插值计算流域面平均雨量;流量及泥沙 资料为流域大坡岭水文站的实测资料,降雨、流量和 泥沙均转换为 0.5h 时段的数据。

3.4 模型率定与检验

分别选取 1990s、2000s 各 10 场洪水,以 0.5 h 为时间步长,前 7 场率定,后 3 场检验。新安江模型为产汇沙模型提供有效的径流输入,参数率定结果见表 2、3。

表 2 新安江模型参数率定结果

年代	UM	LM	С	WM	В	SM	EX	KG	KI	CS	CI	CG	L	
1990s	20	60	0.1	120	0.4	47	1.2	0.42	0.28	0.85	0.91	0.997	3	
2000s	20	60	0.1	120	0.4	45	1.2	0.45	0.25	0.83	0.91	0.995	3	

表 3 泥沙负荷次洪模型参数率定结果

皮旦	幺粉	会 粉 善 2	0.5 h 次洪模型		
庁ち	沙 奴	参 奴 息又	1990s	2000s	
1	СМ	坡面最大水流携沙能力/(kg⋅m ⁻³)	5	5	
2	REMM	坡面最大抗侵蚀能力/kg	2500	2500	
3	a_0	坡面抗侵蚀能力为零时的面积比	0.25	0.25	
4	BS	抗侵蚀能力空间分布变曲线指数	0.8	0.8	
5	CGM	平均沟道产沙浓度/(kg・m ⁻³)	2.83	1.4	
6	BV	关系式系数	1.8	1.6	
7	KS	坡面平均汇沙时间/h	0.3	0.3	
8	KES	沟道泥沙传播时间/h	0.5	0.5	
9	XES	泥沙比重系数	0.4	0.4	

4 结果与分析

4.1 暴雨产沙模拟结果

模拟结果精度包括输沙量相对误差 RES、沙峰 误差 REPS、峰现滞时 ΔT 及确定性系数 NSES,计算 公式如下:

$$RES = (S_c - S_o)/S_o \tag{1}$$

$$REPS = \frac{OSR_{PC} - OSR_{PO}}{OSR_{PO}} \times 100\%$$
(2)

$$NSES = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (OSR_{ci} - OSR_{oi})^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (OSR_{oi} - \overline{OSR_{o}})^{2}}$$
(3)

式中: S_e 为计算输沙量, 10^4 t; S_o 为实测输沙量, 10^4 t; OSR_{PC} 为计算沙峰,t/s; OSR_{PO} 为实测沙峰,t/s; OSR_{ci} 为第i时刻计算输沙率,t/s; OSR_{oi} 为第i时刻 实测输沙率,t/s; $\overline{OSR_o}$ 为平均实测输沙率,t/s。

产沙模拟结果要求 RES、REPS < 30%, NSES >0.5,基于以上精度要求,分析模型模拟效果。由表4、表5可知,两个年代模拟结果都在误差允许范围内。20世纪90年代有2场洪水 RES > 20%, REPS 除#19960628、#19980701两场洪水外都 < 10%, NSES 在 0.6 ~ 0.93 内。2000s 有3场洪水 RES 相对误差大于 20%, NSES 在 0.52 ~ 0.97 内, 模拟效果略差于 20世纪 90年代。根据上述表明, 模型在研究区适用性较高,可有效模拟研究流域产水、产沙时空过程。

4.2 土地利用变化对降雨 – 泥沙负荷关系的影响 分析

由图 2 可知,降雨 - 泥沙负荷关系在两个年代相 关性均较高,相关系数分别为 0.71 和 0.9,且 2000s 相关关系更好,表明流域土地利用模式变化导致产沙 特性也发生了变化,这为根据流域暴雨估算产沙量的 研究提供了理论依据。图 2 还可看出相同的降雨对 应的产沙 90s 均大于 2000s,表明从 1990s 到 2000s 土 地利用变化有效减轻了流域水土流失,即 2000s 的土 地利用更有利于流域生态系统健康。



图 2 不同土地利用模式下降雨 - 产沙关系

4.3 土地利用变化对暴雨产沙特性影响分析

选取 1990s 的 10 场洪水对应的降水资料,在相同降雨条件下,分别在 1990s 和 2000s 土地利用模式下模拟流域产沙过程,分析土地利用变化对次洪产沙特性的影响,揭示不同土地利用模式下的产沙规律,结果见表 6。

表4 199	Os 土地利用模式	に下次洪 0.5 h) 产汇沙模拟成果
--------	-----------	-------------------	-----------

应用	洲水炉旦	实测	实测	计算	输沙量相对	沙峰误差/	确定性	峰现时差/
	供小师写	降雨/mm	输沙量/万 t	输沙量/万 t	误差/%	%	系数	h
	19910705	109.1	18.83	16.49	-12.4	4.5	0.81	-4.0
	19910805	187.7	28.06	32.65	16.4	0.7	0.79	-2.5
	19940712	65.2	1.47	1.51	2.8	8.3	0.56	-1.0
率定	19960628	139.9	20.62	24.58	19.2	-11.5	0.94	0
	19960707	92.3	6.85	8.25	20.3	-5.3	0.77	-1.5
	19970716	114.8	18.79	19.68	4.7	5.7	0.82	0
	19980701	83.9	17.65	16.5	-6.6	- 14.6	0.87	-1.0
	19980802	161.3	18.35	17.99	-1.9	4.9	0.81	2.5
验证	19980809	122.8	30.36	37.36	23.1	-6.5	0.93	0.5
	19980813	93.6	15.5	15.48	-0.3	-4.5	0.93	-1.5

表 5 2000s 土地利用模式下次洪 0.5 h 产汇沙模拟成果

				X 1. 6464		<u></u>		16
应田	进业纪星	实测	实测	计算	输沙量相对	沙峰误差/	确定性	峰现时差/
应用	供小师与	降雨/mm	输沙量/万 t	输沙量/万 t	误差/%	%	系数	h
率定期	20020622	131.9	20.03	17.87	- 10.8	-29.4	0.52	1.0
	20030720	82.6	5.44	6.45	18.7	4.1	0.97	0
	20040804	84.4	3.99	5.11	27.8	3.8	0.78	1.5
	20050710	157	36.25	31.24	-13.8	-8.5	0.62	1.0
	20050828	128.3	20.05	19.6	-2.2	8.3	0.78	2.0
	20060728	22.1	1	0.87	-13.5	- 18.9	0.74	0
	20070703	109.8	13.7	13.32	-2.7	-11.5	0.92	-1.0
验证期	20080721	195.5	13.69	17.42	27.3	7.5	0.81	1.0
	20090826	148.3	10.39	12.62	21.4	-4.8	0.88	-0.5
	20100717	289.8	41.24	46.75	13.4	- 16.4	0.92	3.5

表6 不同土地利用模式下的产沙特性变化统计结果

沖水炉旦	实测降雨/	沙量变化率/	计算沙峰	$/(t \cdot s^{-1})$	沙峰	峰现时间	侵蚀模数/(t	$\cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)
供小师与	mm	%	1990s	2000s	变化率/%	变化/h	1990s	2000s
19910705	109.1	-43.66	5.10	3.43	- 32.8	0	1.424	0.814
19910805	187.7	-40.84	4.88	2.96	- 39.3	-0.5	1.006	0.774
19940712	65.2	-37.50	0.73	0.46	- 36.8	0	0.114	0.048
19960628	139.9	-31.36	6.44	5.11	-20.6	0	1.732	1.162
19960707	92.3	-21.26	1.25	0.92	-26.8	0	0.349	0.498
19970716	114.8	-34.51	6.01	4.77	-20.7	0	1.419	1.145
19980701	83.9	-41.26	3.59	2.07	-42.5	0	0.470	1.320
19980802	161.3	-41.99	3.76	2.46	-34.5	0	1.137	0.800
19980809	122.8	-31.17	7.39	5.54	-25.0	-2.5	2.573	1.282
19980813	93.6	-28.60	4.54	3.39	-25.2	0	2.565	0.216

下面从输沙量、沙峰、峰现时间、产沙模数等角 度分析土地利用变化对流域次洪产沙特性的影响。 其中,产沙模数(土壤侵蚀模数)是指单位面积土壤 及土壤母质在单位时间内侵蚀量的大小,用以反映 某区域单位时间内侵蚀强度的大小。

由表6可看出,相同降水条件下,与1990s相 比,2000s土地利用模式下模拟得到的输沙量下降 21%~43%,对应的侵蚀模数也减小,沙峰下降 20%~42%,峰现时间提前0~2.5h。1990s到 2000s,总径流量增大,径流成分变化为:地表径流增 大,壤中流减小,地下径流增大,但直接径流(RS+ RI)减小,削减河道流量过程,沟道产沙也随之减 小,而本次产汇沙模型中流域产沙主要取决于沟道 产沙。因此,2000s 输沙量、沙峰和侵蚀模数均减 小。上述分析表明 2000s 的土地利用模式可减轻水 土流失,即通过改变土地利用模式可有效控制水土 流失。对于峰现时间,水田筑有田埂,用以蓄水,其 调蓄作用大,1990s的水田转为旱地后,田埂作用消 失,对水流及泥沙运动的阻碍作用明显下降,尤其体 现在汇流、汇沙速度快的洪水,因此#19910805 和# 19980809两场洪水的沙峰峰现时间提前。

5 结 论

本文以淮河上游大坡岭以上流域为研究区,建 立研究区水沙模型模拟流域暴雨产沙,分析土地利 用模式变化对次暴雨 - 泥沙负荷关系的影响及相同 暴雨条件下其对产沙特性的影响。结果表明:模拟 结果满足精度要求;土地利用模式变化改变了降雨 -泥沙负荷关系,2000s的土地利用减轻了流域水 土流失;1990s到2000s的土地利用变化导致次暴雨 产沙量、沙峰及侵蚀模数均减少,峰现时间提前。论 文研究成果拓展了新安江模型在淮河流域水土流失 模拟方面的应用,为流域水土资源的开发利用奠定 科学基础,同时研究方法对其它湿润半湿润地区也 具有借鉴作用。

参考文献:

- [1] 刘昌明,李道峰,田英,等. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J]. 地理科学进展,2003,22
 (5):437-445.
- [2] 冯平.流域下垫面变化对洪水径流的影响分析[J].农业,生态水安全及寒区水科学——第八届中国水论坛摘要集,2010.
- [3] Cai Tao, Li Qiongfang, Yu Meixiu, et al. Investigation into the impacts of land – use change on runoff generation characteristics in the upper Huaihe River basin, China [J]. Journal of Hydrologic Engineering. 2013,18(11):1464 – 1470.
- [4] Wang Guoqing, Zhang J Y, Pagano T C, et al. Identifying contributions of climate change and human activity to changes in runoff using Epoch detection and hydrologic simulation [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18 (11):1385-1392.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Cai Tao, Li Qiongfang, Yu Meixiu, et al. Investigation into the impacts of land – use change on sediment yield characteristics in the upper Huaihe River basin, China [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2012,53:1-9.
- [8] 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.
- [9] 胡续礼,姜小三,潘剑君,等. GIS 支持下淮河流域土壤 侵蚀的综合评价[J].土壤,2007,39(3):404-407.
- [10] 陈芸芸, 王 烨, 陆国宾, 等. 基于双源蒸散发的新安江 模型在淮河上游的应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(3):43-46.
- [11] 邹宏荣, 王 烨, 陆国宾, 等. 淮河上游产沙模拟研究[J]. 水资源保护, 2016(录用待刊).
- [12] 王珂清,曾燕,谢至清,等. 1961 2008 年淮河流域气温 和降水变化趋势[J]. 气象科学,2012,32(6):671-677.