

# 基于水动力模型的土地利用格局对 流域雨洪过程的影响研究

孙亚联<sup>1</sup>, 李继成<sup>1</sup>, 杨东<sup>2</sup>, 白岗岗<sup>2</sup>, 郭凯华<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 西安理工大学  
省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 为了定量分析不同土地利用对流域雨洪过程的影响, 建立流域雨洪水动力数值模型, 模拟了王茂沟流域不同土地利用情景方案的地表径流过程, 对比流域洪峰流量削减程度。结果表明: 在重现期为2、10、50、100 a一遇降雨条件下, 对于不同土地利用情景方案, 林地的位置对径流量影响较大; 林地处于流域坡面下部时, 对洪峰流量的削减作用最大; 降雨重现期越长, 林地处于流域坡面下部的削峰效果越好。该研究结果在优化流域内土地利用方案规划等方面具有重要意义。

**关键词:** 土地利用; 流域雨洪过程; 二维浅水方程; 水动力模型; 洪峰流量

中图分类号: TV122+.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)06-0036-05

## Impact of land use change on catchment stormwater flooding process based on a hydrodynamic model

SUN Yalian<sup>1</sup>, LI Jicheng<sup>1</sup>, YANG Dong<sup>2</sup>, BAI Ganggang<sup>2</sup>, GUO Kaihua<sup>2</sup>

(1. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 2. State Key Laboratory of  
Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** To quantitatively analyze the impact of different land uses on the stormwater flooding process, a catchment hydrodynamic model was adopted to simulate the surface runoff process of Wangmaogou River Basin under different land use scenarios, meanwhile the reductions of peak discharge were compared and analyzed. The results show that the location of the forest land has a great influence on the runoff compared to the other land uses under the rainfall return period of 2 a, 10 a, 50 a and 100 a. When the forest land is located in the downstream of the basin, it has the largest reduction effect on the peak discharge. As the rainfall return period increases, the peak reduction effect of the forest land in the downstream of the basin becomes more remarkable. This study can provide practical guidance for the optimization of land use layout in the basin.

**Key words:** land use; catchment stormwater flooding process; two-dimensional shallow water equation; hydrodynamic model; peak discharge

## 1 研究背景

下垫面土地利用空间格局变化和地形的复杂性会对流域雨洪过程产生重要的影响, 引起地表径流过程变化<sup>[1]</sup>。近年来, 多数研究人员侧重于通过研究人类活动所造成的土地利用变化对水文过程的影响, 探讨流域土地利用与径流过程之间的关系<sup>[2]</sup>。

Yira等<sup>[3]</sup>将城市化过程中不同年份的土地利用条件作为模型的输入, 建立了植被减少与总径流量增加之间的因果关系。Luo等<sup>[4]</sup>利用IDF曲线工具探讨了1976-2006年卡莫河流域在设计极端降雨条件下土地利用变化对水文响应的影响。高倩等<sup>[5]</sup>在对大汶河流域实测资料的研究中发现其年径流变化趋势与耕地、草地、林地等极端土地利用情景有重要

收稿日期: 2020-01-11; 修回日期: 2020-06-02

作者简介: 孙亚联(1980-), 女, 陕西咸阳人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水利水电工程。

通讯作者: 李继成(1980-), 男, 陕西咸阳人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水利水电工程。

联系。邓睿等<sup>[6]</sup>也在其研究中发现地表径流过程受土地利用的影响显著。但是,目前的研究只是分析了不同土地利用下的径流变化趋势,并未研究土地利用空间格局的变化与流域内径流的关系。故开展流域内土地利用变化对径流过程的影响规律的研究尤为重要。当前采用水文模型和计算水动力学的方法模拟流域雨洪过程的研究成果较多<sup>[7-9]</sup>,Liu等<sup>[10]</sup>将基于网格的物理概念水文模型应用于卢森堡的一个流域,并模拟了不同土地利用类型的暴雨径流贡献率。Notter等<sup>[11]</sup>使用基于网格的半分布式水平衡模型来预测肯尼亚中尺度流域的流量。

上述研究均采用水文学方法,未充分考虑物理过程,因而无法可靠地预测重要的动力学变量,从而不能准确模拟地表径流过程。国内外很多学者开展了关于二维水动力模型对雨洪过程的模拟研究,侯精明等<sup>[12]</sup>发现采用二维水动力模型有较高的模拟精度和计算效率,能对复杂的城市雨洪过程进行模拟;Liang等<sup>[13]</sup>采用HiPIMS模型模拟了大规模流域雨洪过程,并且考虑了不同土地利用类型;Luo等<sup>[14]</sup>提出一种经校准的洪水淹没模型,评估了4个极端降雨事件对河内中心地区水深和淹没面积的影响;刘强等<sup>[15]</sup>建立了能适应复杂地形的水动力学模型,对洪水演进过程进行了模拟。

本文基于二维浅水方程,建立了王茂沟流域雨洪模型。分析了不同土地利用情景在不同重现期降雨条件下的断面流量变化情况,探讨了土地利用变化对流域雨洪过程的影响。通过该研究可为流域土地利用规划提供参考依据,也为相关部门制定流域防洪方案提供技术支持。

## 2 水动力模型原理

### 2.1 控制方程

基于求解二维浅水方程,建立了流域雨洪水动力模型,模拟水文及水动力过程。模型的控制方程为平面二维浅水方程(SWEs),表达式如下:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (1)$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} q_x \\ uq_x + gh^2/2 \\ uq_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} q_y \\ vq_x \\ vq_y + gh^2/2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} i \\ -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - C_f u \sqrt{u^2 + v^2} \\ -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{q}$ 为变量矢量,包含水深 $h$ 、两个方向的单宽流量 $q_x$ 和 $q_y$ ;  $g$ 为重力加速度, $m/s^2$ ;  $u$ 和 $v$ 分别为 $x$ 、 $y$ 方向的流速, $m/s$ ;  $\mathbf{F}$ 和 $\mathbf{G}$ 分别为 $x$ 、 $y$ 方向的通量矢量;  $\mathbf{S}$ 为源项矢量,包含底坡源项、摩擦源项和降雨源项等;  $z_b$ 为河床底面高程, $m$ ;  $C_f$ 为床面摩擦系数,  $C_f = gn^2/h^{1/3}$ ;  $n$ 为曼宁系数。

### 2.2 数值方法

模型对二维浅水方程的求解方式采用Godunov格式的有限体积法进行空间离散求解,采用HLLC近似黎曼求解器计算其质量与动量通量<sup>[16]</sup>。而对于干湿边界处的负水深问题采用净水重构方法解决<sup>[17-20]</sup>。模型可对计算单元实现全稳计算,主要采用了底坡通量法解决复杂地形下的动量不守恒问题。在时间步长推进方面,采用二阶显式Runge-Kutta方法保证其时间计算的二阶精度。采用MUSCL格式有效地解决由非物理现象所引起的计算不稳定性及物质动量的不守恒性。

## 3 模型构建与验证

### 3.1 研究区域概况

王茂沟流域是无定河左岸一级支流韭园沟的一条支沟,地处陕西省绥德县王茂庄村<sup>[21]</sup>。流域内全年95%的产沙量主要集中在汛期<sup>[22]</sup>,1950年之后主要采用兴修水平梯田、造林种草、修筑淤地坝等工程与非工程措施进行流域水土保持治理工作,截止2012年底,该流域总治理面积达到446.60  $hm^2$ ,治理程度为77.7%<sup>[23]</sup>。通过ArcGIS软件及实地考察对流域影像图进行土地利用类型进行分类,将流域内土地划分为林地、草地、梯田、交通用地等8种类型。图1为研究区数字高程数据及采用Landsat卫星获取的2010年土地利用类型分布。

### 3.2 基础数据及参数率定

模型的输入条件包含降雨数据、下渗数据、地形数据和土地利用资料,其中降雨数据采用芝加哥设计降雨数据,实测降雨数据来自位于王茂沟流域出口处的王茂沟水文站,图2为2012年7月15日

0:25 - 5:25 的一场降雨过程,重现期约为 100 a。土地利用的曼宁系数和下渗率均依据参考文献 [16]、[17] 及工程经验取值。为了更加精确地对流域雨洪过程进行模拟计算,地形数据采用分辨率为  $2\text{ m} \times 2\text{ m}$  的高精度数据,流域地形的计算单元总数为 452 124 个网格。

### 3.3 模型验证

基于所建立的流域雨洪水动力模型,将前节描

述的 2012 年 7 月 15 日降雨数据作为模型降雨输入,获得流域出口处的断面流量结果,图 3 为出口断面处模拟流量与实测数据对比图,由图 3 可以看出,模拟结果与实测数据的趋势基本一致。Nash - Sutcliffe 效率系数 ( $NSE$ ) 值能够反映模拟结果与实测数据的一致性程度,通过计算得出  $NSE = 0.73$ ,也说明模拟结果较好。通过验证表明,该流域雨洪水动力模型可实现对王茂沟流域的雨洪过程模拟。

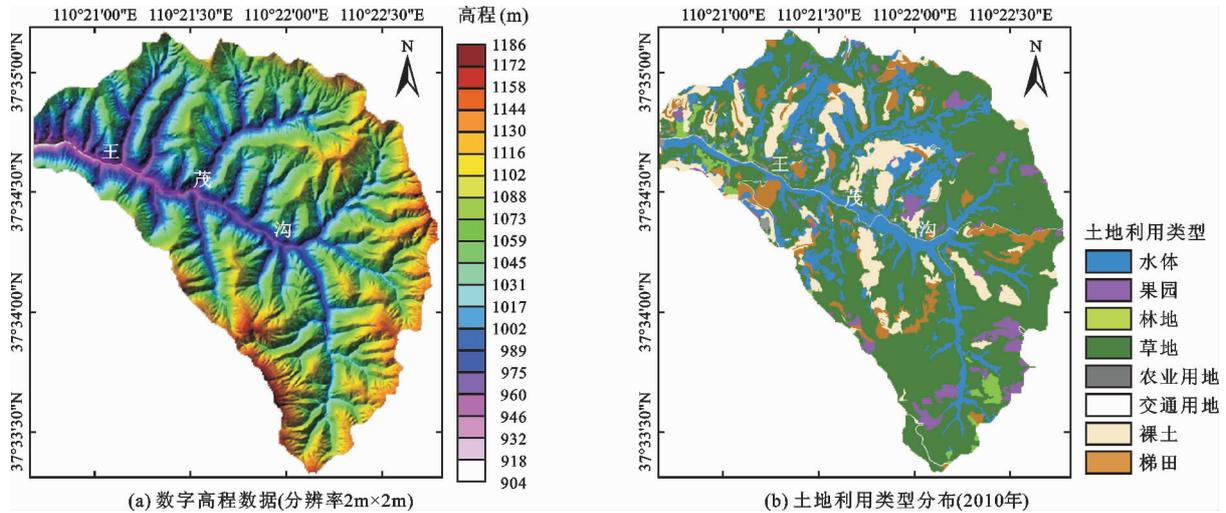


图 1 王茂沟流域数字高程数据及土地利用类型分布

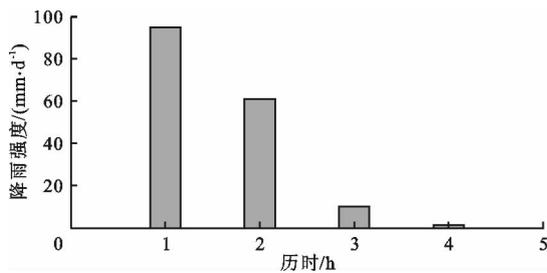


图 2 王茂沟流域 2012 年 7 月 15 日 0:25 - 5:25 观测降雨过程

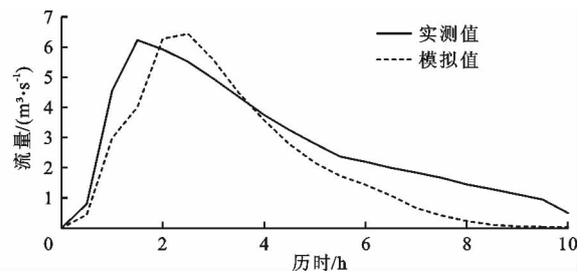


图 3 王茂沟流域出口断面流量模拟值与实测值对比(2012 年 7 月 15 日降雨过程)

## 4 结果与分析

### 4.1 王茂沟流域土地利用情景方案设置

为进一步量化分析不同土地利用变化对流域雨洪过程的敏感性,以王茂沟流域为研究区,分别取 2、10、50、100 a 重现期的陕西绥德县设计暴雨,对 3 种不同土地利用情景进行径流过程模拟。王磊等<sup>[24]</sup>通过研究发现林地和草地均具有截留径流的作用,但是林地对径流的截留作用大于草地,故本文以林地为主要径流控制因素进行研究。将王茂沟流域设定为 3 种主要类型的土地利用模式,分别为林地、草地及裸地。设置 3 种情景方案,情景 1:林地于流域坡面的上部区域;情景 2:林地于流域坡

面的中部区域;情景 3:林地于流域坡面的下部区域,3 种情景的河道均为裸地,其余的区域为草地。每种情景的各土地利用类型的面积均相同,如坡面的林地面积相同且均占坡面面积的  $1/3$ 。王茂沟流域 3 种土地利用情景设置见图 4。

### 4.2 基于情景模拟的流域雨洪过程径流分析

地表径流的形成与当地降雨量、降雨强度以及植被情况、土壤性质等方面密切相关<sup>[25-26]</sup>。径流形成的第一驱动因素即为降雨,地表径流随着降雨量的增大而增大;在降雨量恒定的情况下,随着降雨强度的增大,地表径流越容易产生。

图 5 所示为不同降雨重现期下 3 种土地利用情景的流域出口流量过程。由图 5 可以看出,随着重现

期的增加,情景 1、情景 2、情景 3 的峰值流量均呈增大趋势,其范围为 2.00 ~ 48.21 m<sup>3</sup>/s。相同重现期下,情景 2 的峰值流量最大,情景 1 的峰值流量与情景 2 相近,情景 3 的峰值流量最小。情景 1 在 2、10、50、100 a 重现期的峰值流量分别为 2.28、21.91、36.48 及 48.21 m<sup>3</sup>/s,情景 3 与情景 1 相比,在 2、10、50、100 a 重现期的降雨事件中其峰值流量削减率依

次为 12.28%、8.95%、13.02% 及 11.95%,情景 3 与情景 2 相比,相应各重现期的峰值流量削减率分别为 12.66%、9.24%、13.26% 及 12.31%。由此可见,情景 3 对峰值流量的削减效果较好,植被对洪水径流的影响主要体现在峰值流量上。

图 6 为王茂沟流域不同降雨重现期下 3 种土地利用情景的出口峰值流量对比。

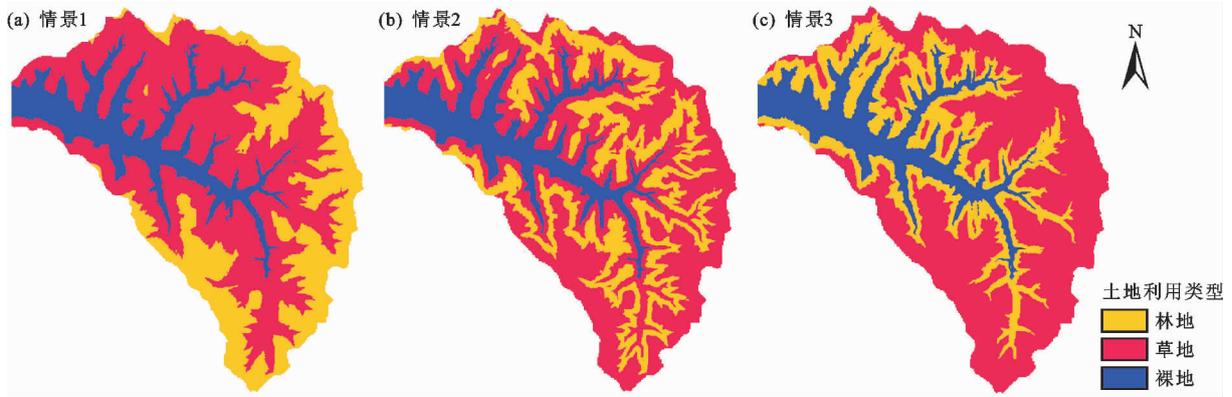


图 4 王茂沟流域 3 种土地利用情景

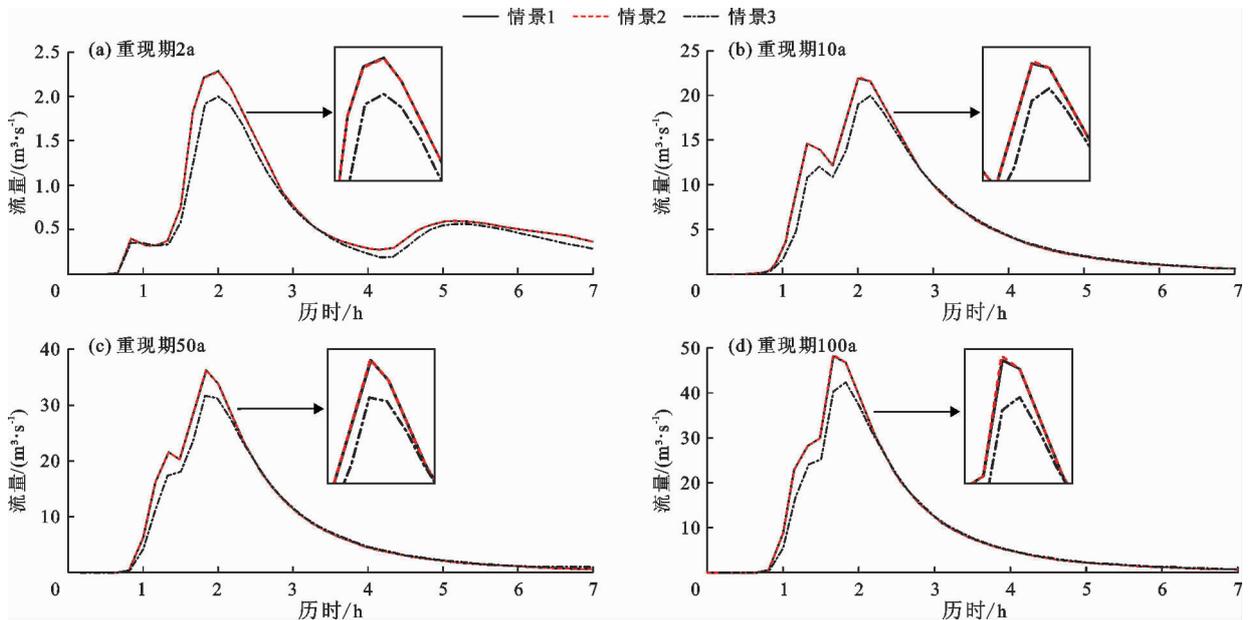


图 5 不同降雨重现期下 3 种土地利用情景的流域出口流量过程

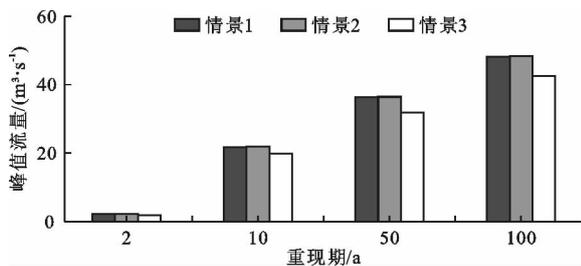


图 6 不同降雨重现期下 3 种土地利用情景流域出口峰值流量对比

由图 6 可以看出,在重现期为 2、10、50 及 100 a 的降雨条件下,情景 1、2、3 均在 100 a 重现期时的峰值流量最大,依次为 48.21、48.41、42.45 m<sup>3</sup>/s,在 2 a 重现期降雨条件下,情景 1、2、3 的峰值流量最小,依次为 2.28、2.29、2.00 m<sup>3</sup>/s。在各降雨重现期下,情景 3 的径流削减过程均较为明显。并且,随着降雨重现期的增加,情景 3 对径流峰值的削减量呈增大趋势。由此得出,在不同土地利用方案中,流域边坡下部的林地可以更为有效地降低地表峰值径流

量,其阻水效果更加明显,从而推迟峰值径流量出现的时间,增加径流过程历时,并且位于下部的林地对洪峰流量的削减作用最佳。因此,在流域中规划土地利用分布时,建议在流域坡面下游处多采用布设林地的方式,以减少流域内地表径流,缓解流域内水土流失状况。

## 5 结 论

本研究通过采用水动力数值模型方法,定量研究了王茂沟流域雨洪过程对不同土地利用模式的响应规律,发现在降雨重现期分别为2、10、50和100 a条件下,不同土地利用格局对洪水径流过程的影响也不相同,其影响随流域地形、土地利用情景和降雨事件的不同而不同,主要结论如下:

(1)3种不同土地利用情景方案中,情景3的流域出口峰值流量最小,林地的空间分布情况对流域径流量影响较大,当林地处于流域边坡下部时,林地对流域洪峰流量的削减作用最为明显。

(2)在同一降雨重现期条件下,情景2的峰值流量最大,情景1与情景2相近,情景3的峰值流量最小;在模拟的各降雨重现期条件下,随着降雨重现期的增加,情景3对流域峰值流量的削减量呈增大趋势,情景3相比情景1、2的峰值流量削减率最大为13.26%。

本文的研究结果可为王茂沟流域及其他流域的水土保持工作提供参考依据,其意义主要体现在土地利用格局的合理优化,从而提高流域边坡截留能力,减小流域径流量,降低洪水灾害风险。由于真实地形情况复杂,不同土地利用模式所涉及的参数和效应可能不同,这会使模拟计算结果产生一定的误差,故仍需进行进一步地研究。

### 参考文献:

[1]班玉龙,孔繁花,尹海伟,等. 土地利用格局对SWMM模型汇流模式选择及相应产流特征的影响[J]. 生态学报, 2016,36(14):4317-4326.

[2]KHOI D N, SUETSUGI T. The responses of hydrological processes and sediment yield to land-use and climate change in the Be River Catchment, Vietnam [J]. Hydrological Processes, 2014,28(3):640-652.

[3]YIRA Y, DIEKKRUGER B, STEUP G, et al. Modeling land use change impacts on water resources in a tropical west African catchment (Dano, Burkina Faso)[J]. Journal of Hydrology, 2016,537:187-199.

[4]LUO Ping, APIP A, HE Bin, et al. Impact assessment of rainfall scenarios and land-use change on hydrologic response using synthetic Area IDF curves [J]. Journal of Flood Risk Management, 2018,11(S1):84-97.

[5]高倩,赵强,杨梦林,等. 气候和土地利用变化对大汶河流域径流的影响[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2019,33(5):439-445+452.

[6]邓睿,张治意,陈亚. 嘉陵江流域下游地表径流对土地利用变化的响应[J]. 水土保持研究, 2019,26(3):141-147.

[7]LIN Bingqing, CHEN Xingwei, YAO Huaxia, et al. Analyses of landuse change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model[J]. Ecological Indicators, 2015,58:55-63.

[8]张成凤,杨晓甜,刘酌希,等. 气候变化和土地利用变化对水文过程影响研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019,40(4):46-50.

[9]SCHUMANN G J P, NEAL J C, VOISIN N, et al. A first large-scale flood inundation forecasting model [J]. Water Resources Research, 2013,49(10):6248-6257.

[10]LIU Y B, GEBREMESKEL S, DE SMEDT F, et al. Predicting storm runoff from different land-use classes using a geographical information system-based distributed model [J]. Hydrological Processes, 2006,20(3):533-548.

[11]NOTTER B, MACMILLAN L, VIVIROLI D, et al. Impacts of environmental change on water resources in the Mt. Kenya region[J]. Journal of Hydrology, 2007,343(3-4):266-278.

[12]侯精明,郭凯华,王志力,等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进展, 2017,28(6):820-828.

[13]LIANG Qihua, XIA Xilin, HOU Jingming. Catchment-scale high-resolution flash flood simulation using the GPU-based technology [J]. Procedia Engineering, 2016,154:975-981.

[14]LUO Pingping, MU Dengrui, XUE Han, et al. Flood inundation assessment for the Hanoi Central Area, Vietnam under historical and extreme rainfall conditions[J]. Scientific Reports, 2018,8:12623.

[15]刘强,秦毅,李国栋,等. 洪水淹没动态分析系统设计与开发[J]. 灾害学, 2017,32(2):72-76+116.

[16]SMITH L S, LIANG Qihua. Towards a generalised GPU/CPU shallow-flow modelling tool[J]. Computers & Fluids, 2013,88:334-343.

[17]HOU Jingming, LIANG Qihua, SIMONS F, et al. A 2D well-balanced shallow flow model for unstructured grids with novel slope source term treatment[J]. Advances in Water Resources, 2013,52:107-131.

- [15] 刘凌妃. 水质有机污染物的三维荧光光谱定性定量分析[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2018.
- [16] 王书涛, 李明珊, 王玉田, 等. 基于三维荧光光谱法和PARAFAC对多环芳烃定性定量分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(2): 494-500.
- [17] COBLE P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 1996, 51(4): 325-346.
- [18] 许瑞, 王胜楠, 陈乐, 等. 基于三维荧光光谱技术解析不同微生物法净化黑臭水体的效果[J]. 环境工程学报, 2020, 14(1): 123-132.
- [19] 马琦琦, 李刚, 魏永. 城郊关键带土壤中溶解性有机物的光谱特性及其时空变异[J]. 环境化学, 2020, 39(2): 455-466.
- [20] 吕伟伟, 姚昕, 张保华. 太湖水体有机质荧光特征及其来源解析[J]. 生态环境学报, 2018, 27(8): 1512-1521.
- [21] 黄廷林, 方开凯, 张春华, 等. 荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3394-3401.
- [22] 冯可心, 李永峰, 姜霞, 等. 丹江口水库表层沉积物有色可溶性有机物空间分布特征及其来源分析[J]. 环境化学, 2016, 35(2): 373-382.
- [23] 郝晓地, 周鹏, 曹亚莉, 等. 污水处理中腐殖质的来源及其演变过程[J]. 环境工程学报, 2017, 11(1): 1-11.
- [24] 曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 等. 城镇化河流溶解性有机物的荧光特性与水质相关性: 以宁波市北仑区芦江为例[J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1560-1567.
- [25] 陈茂福, 吴静, 律严励, 等. 城市污水的三维荧光指纹特征[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 578-582.
- [26] 吴静, 崔硕, 苏伟, 等. 北京城市水体的三维荧光特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1562-1566.
- [27] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838-2002[S]. 北京: 环境科学出版社, 2002.
- [28] 陈毅忠, 杜尔登, 王聿琳, 等. 三维荧光组合PARAFAC分析评估城市水体DOM特征分布与来源[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2017, 29(6): 55-62.
- [29] 胡霞, 程艳, 贾尔恒·阿哈提, 等. 西北内陆城市河段水体CDOM三维荧光指纹特征研究[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(S1): 226-231.
- [30] 刘堰杨, 秦纪洪, 刘琛, 等. 基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体CDOM特征[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 720-728.
- [31] 张海威, 张飞, 李哲, 等. 新疆艾比湖主要入湖河流精河与博尔塔拉河三维荧光光谱特性及其与水质的关系[J]. 湖泊科学, 2017, 29(5): 1112-1120.
- [32] 孟永霞, 程艳, 李琳, 等. 西北内陆小流域水体DOM三维荧光光谱特征[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(9): 134-141.

(上接第40页)

- [18] HOU Jingming, SIMONS F, MAHGOUB M, et al. A robust well-balanced model on unstructured grids for shallow water flows with wetting and drying over complex topography[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2013, 257: 126-149.
- [19] ENGMAN E T. Roughness coefficients for routing surface runoff[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1986, 112(1): 39-53.
- [20] LI Zhong, CHAO Shijun, DONG Jinqun. Study on ecological environment influence of different age of hippophae in hilly and gully region on the Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(5): 115-120.
- [21] 李林. 黄土丘陵区流域土壤水资源变化与消耗-补偿模式研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [22] 马勇勇. 王茂沟流域生态建设对水沙连通性的影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [23] 惠波, 李鹏, 张维, 等. 王茂沟流域淤地坝系土壤颗粒与有机碳分布特征研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(4): 1-5.
- [24] 王磊, 刘亭亭, 谢建治. 基于SWAT模型的张家口清水河流域土地利用情景变化对径流影响研究[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 245-251.
- [25] 白岗岗, 侯精明, 史玉品, 等. 基于支持向量机的葫芦河流域径流变化的多因素贡献率分析[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 112-117.
- [26] 何周窃, 苏正安, 王勇, 等. 干热河谷冲沟发育区土壤细沟可蚀性及主要影响因素[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 8-13+27.