

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.032

土地利用方式变化对水循环过程响应机制研究

官兴龙 付强 王斌 关英红 邢贞相 李衡

(东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要:以挠力河流域为研究区,利用1990年和2013年土地利用类型,结合基于格子玻尔兹曼方法(LBM)的TOPMODEL模型定量评价了土地利用方式变化对水循环时空变化过程的影响。结果表明:基于LBM法的TOPMODEL模型可以很好模拟挠力河流域降雨径流水循环过程,对研究区具有较高的适用性;研究区林地、草地和建设用地面积变化不大,对于土地结构变化贡献比较小,而未利用地和旱田部分转为水田对土地结构变化贡献大;由于种植水田,导致5月到10月间的流域总蒸散发量增加、根系区缺水减少、非饱和带缺水减少、地表水量减少、地下水量增加;蒸散发增幅达8.9%,根系区缺水降幅达10.5%,地表水量减少达43%;水田对水文情势影响的差异主要体现在水稻生育期的差异上,分蘖期对蒸散发量、根系区缺水量和非饱和带缺水影响较大;水田灌溉对水循环过程的影响按变化幅度从大到小的顺序为非饱和带缺水、根系区缺水、蒸散发量、入根系区水量、出根系区水量和地下径流量,其中入根系区水量差值和出根系区水量差值接近。

关键词:土地利用方式变化;农业结构改变;格子玻尔兹曼法;TOPMODEL;挠力河流域;水循环过程

中图分类号:TV133.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1298(2018)02-0252-08

Mechanism of Response of Land Use Change to Water Cycle Process

GONG Xinglong FU Qiang WANG Bin GUAN Yinghong XING Zhenxiang LI Heng
(College of Water Conservancy and Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Based on the farmland distribution maps of Naolihe River Basin in 1990 and 2013, the influences of paddy farmland and cultivation activity on temporal and spatial variation of water cycle process were analyzed quantitatively, combining with TOPMODEL model based on LBM method. Results showed that TOPMODEL model based on LBM method could simulate well the rainfall runoff process of Naolihe River Basin, and it had a high applicability on the investigated river basin. The area of forest land, grassland and construction land was not changed much, which contributed little to the change of land structure, while unused farmland and dry farmland were partly converted to paddy farmland, contributing obviously to the change of land structure. The presence of paddy farmland resulted in the increase of total evapotranspiration, decrease of the water deficit in root zone, decrease of water deficit in the unsaturated zone, decrease of surface water, and increase of underground water from May to October. Evapotranspiration was increased by 8.9%, water deficit in the root area was decreased by 10.5%, and surface water was decreased by 43%. Paddy farmland showed different effects on hydrological variables when rice was in different growth stages. It had great influence on evapotranspiration, water deficit in root zone and water deficit in unsaturated zone when rice was in tillering stage. The influence of paddy farmland irrigation on different water cycle processes was diminished in the sequence of SBAR, RZ, E, water quantity in inlet of root zone, water quantity in outlet of root zone, and RG, among which the differences of water quantity between irrigation and non-irrigation were almost the same for the inlet and outlet of root zone.

Key words: land use changes; change of agricultural structure; LBM; TOPMODEL; Naolihe River Basin; water cycle process

收稿日期:2017-05-31 修回日期:2017-06-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51109036,51408107)、中国博士后科学基金项目(2013M541332)、黑龙江省水利厅科研开发项目(201318,201404)和东北农业大学科学研究基金项目(2012RCB57)

作者简介:官兴龙(1978—),男,副教授,博士,主要从事流域水文模型及水流运动数值模型研究,E-mail:gongxl@neau.edu.cn

通信作者:付强(1973—),男,教授,博士,主要从事水土资源高效利用研究,E-mail:fuqiangneau@sina.cn

0 引言

土地利用方式和覆被的变化(LUCC)是流域水循环过程发生变化的重要影响因素^[1],LUCC主要是通过改变蒸发量、地表水深和土壤水分剖面含水率等,进而对流域的水循环过程产生影响,这直接导致流域水资源供需平衡发生了变化,对流域的经济、社会、生态和环境等方面产生显著的影响。因此,研究LUCC对水循环过程的影响,已成为全球研究水循环过程变化问题的热点研究方向^[2-3]。近几年学者对此进行了大量的研究,如陈莹等^[4]通过设置太湖西苕溪流域不同情景土地、覆被变化产生的长期水文效应,探讨分析LUCC对水循环过程的影响。史晓亮等^[5]根据滦河流域1985年和2000年土地利用数据,结合SWAT模型分析了流域景观变化对流域径流变化的响应关系。欧春平等^[6]利用SWAT模型定量解析土地利用覆被变化对蒸发、径流等水循环要素的影响。郝芳华等^[7]将洛河流域的不同土地利用方式作为模型的输入,探索了土地利用方式变化对产流和径流的影响。这些研究基本上是根据流域景观和地貌变化,通过水文模型模拟LUCC对流域水文循环的影响,在流域和子流域尺度上探讨这些变化直接导致水资源供需关系发生的变化,从而对流域生态环境以及经济发展等多方面造成显著影响^[8-10]。但上述研究在以下3个方面研究较少:①较少从空间尺度上分析土地利用变化的水文响应,即使采用分布式水文模型描述水循环,但因网格尺寸太大如流域或子流域尺度,导致难以反映土地变化引起的单元内部水文效应。②对径流总量和蒸发量的影响研究较多,而对根系区、饱和带含水率、非饱和带含水率及他们之间的水分交换量研究较少。③对人类具体活动的影响考虑不足,比如耕作方式、农作物各个灌溉时期的灌水量和农作物每一个时期蒸发量等没有具体反映。

基于此,本文根据F-H蓝图模型建模思想改进TOPMODEL模型,构建基于栅格和LBM的具有物理基础的分布式TOPMODEL模型。在处理水流运动过程采用格子玻尔兹曼方法建立坡面和河道汇流过程的数值模型,运用LBM法求解非饱和区

Richards运动过程,运用达西定律法建立饱和区土壤水运动数值模型。对于人类具体活动的影响,本文选定黑龙江支流乌苏里江左岸支流挠力河流域,该区域在1990年后水田种植面积增加显著,土地类型发生明显的改变^[11-15]。在对比分析1990年与2013年水田变化情况的基础上,分析有水田和无水田两种情况下的土地利用方式、覆被的变化和人类活动综合影响下的水循环过程时空变化情况。

1 研究区域位置与土地利用方式

挠力河流域位于黑龙江省佳木斯市境内,汇入乌苏里江,其位置见图1。多年平均降雨量528 mm,径流深为100 mm。该流域位于三江平原腹地,上游为丘陵区,坡度比较陡,中下游为平原区和湿地交融区。有七星河流域和挠力河流域等两个国家湿地自然保护区。地下水资源丰富,是中国的粮食主产区,有八五二、八五三、胜利和红卫等农场。挠力河流域利用地下水灌溉水稻田,与旱田相比水田经济效益明显提高,因此水稻田面积急剧扩大^[11-13]。本研究土地类型数据采用美国资源卫星Landsat获得的1999年和2013年影像资料。利用由美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量的SRTM数据获得的3sDEM数据提取的挠力河流域为基准进行校准,见图2。根据图2的土地类型数据信息分析得到1990—2013年挠力河流域土地利用变化转移矩阵,见表1。



图1 挠力河流域位置图

Fig. 1 Location map of Naolihe River Basin

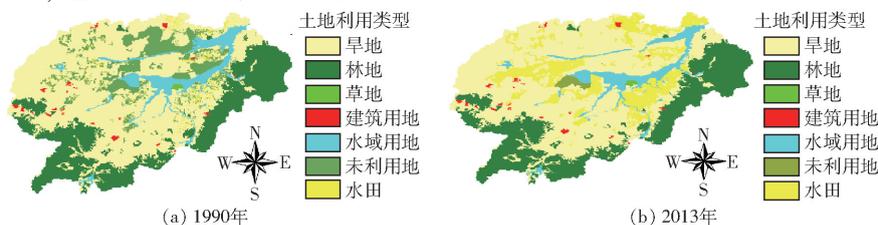


图2 挠力河流域不同年份土地利用类型图

Fig. 2 Land use types of Naolihe River Basin in different years

表1 1990—2013年挠力河流域土地利用转移矩阵

Tab.1 Transfer matrix of land use change of Naolihe River Basin in 1990—2013

万 hm²

年份	地类	1990							总计
		草地	旱地	建设用地	林地	水田	水域用地	未利用地	
2013	草地	0	0.09	0	0	0	0	0	0.09
	旱地	0.13	68.05	0.10	8.57	6.95	0.40	10.7	94.90
	建设用地	0	0.63	3.87	0.17	0.01	0.01	0.01	4.70
	林地	0	0.36	0.01	61.13	0	0.02	0.08	61.60
	水田	0	34.66	0.03	0.42	12.67	0.24	5.64	53.66
	水域用地	0.05	0.52	0	0.06	0	1.64	0	2.27
	未利用地	0.42	0.02	0.01	0.07	0.02	0	2.33	2.87
	总计	0.60	104.33	4.02	70.42	19.65	2.31	18.76	220.09

由表1和图2可得,挠力河流域耕地面积由1990年的124万hm²增加到2013年的149万hm²,增加了25万hm²,垦殖率高达67.5%。由表1可得,草地与建设用地面积变化不大,对于土地结构变化贡献比较小。林地于挠力河流域的南部和东南部的山丘区,对耕地面积贡献小于0.5%。草地和林地对于水田耕地面积基本没有贡献。未利用地从1990年的18.76万hm²降至2013年的2.87万hm²,大部分转为水田耕地。由表1可得,水田耕地面积由1990年的19.65万hm²增加到2013年的53.66万hm²,年均增长率7.52%。旱田耕地面积由1990年的104.33万hm²略微下降到2013年的94.90万hm²,但旱地仍然是主要的耕地类型。

2 水文模型搭建

2.1 坡面汇流模型

坡面流动采用运动波方程来描述,为

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial\left(\frac{1}{2}gh^2\right)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} + \frac{\partial\left(\frac{1}{2}gh^2\right)}{\partial y} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 h ——水深 u ——水平方向流速

v ——垂直方向流速

g ——重力加速度

式(1)用九点速度模型求得平衡态分布函数为^[16-18]

$$f_{\alpha}^{eq} = \begin{cases} \frac{4}{9}h \left[\left(\frac{9}{4} - \frac{45}{24}gh \right) - \frac{3}{2}v^2 \right] & (\alpha=0) \\ \frac{h}{9} \left[\frac{3}{2}gh + 3e_{\alpha}v + \frac{9}{2}(e_{\alpha}v)^2 - \frac{3}{2}v^2 \right] & (\alpha=1,2,3,4) \\ \frac{h}{36} \left[\frac{3}{2}gh + 3e_{\alpha}v + \frac{9}{2}(e_{\alpha}v)^2 - \frac{3}{2}v^2 \right] & (\alpha=5,6,7,8) \end{cases} \quad (2)$$

式中 e_{α} —— α 方向的粒子运动速度

2.2 河道汇流模型

河道水流运动采用线性扩散波方程来描述,为

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c_k \frac{\partial Q}{\partial x} = D_k \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (3)$$

式中 c_k ——波速 D_k ——扩散系数

Q ——河道流量

采用五速模型可得平衡态分布函数为

$$\begin{cases} f_2^{eq} = \frac{1}{24}(2B_H - C_H - 2D_H + E_H) \\ f_1^{eq} = \frac{1}{6}(-4B_H + 4C_H + D_H - E_H) \\ f_0^{eq} = A_H - \frac{5}{4}C_H + \frac{1}{4}E_H \\ f_3^{eq} = \frac{1}{6}(4B_H + 4C_H - D_H - E_H) \\ f_4^{eq} = \frac{1}{24}(-2B_H - C_H + 2D_H + E_H) \end{cases} \quad (4)$$

式中 A_H, B_H, C_H, D_H, E_H ——中间变量

2.3 土壤水运移模型

非饱和土壤水运动采用 Richards 方程,为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - T \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (5)$$

式中 D_1 ——扩散系数 T ——导水系数

θ ——土壤含水率

选用三速模型可得平衡态分布函数为

$$\begin{cases} f_1^{eq} = \frac{1}{2C_2^2}(C_2 - C_2B_2) \\ f_0^{eq} = \frac{1}{C_2^2}(A_2C_2^2 - C_2) \\ f_2^{eq} = \frac{1}{2C_2^2}(C_2 + C_2B_2) \end{cases} \quad (6)$$

式中 A_2, B_2, C_2 ——中间变量

2.4 水稻田生育期灌溉及蒸发管理

鉴于以往研究种植结构变化对水循环过程的影

响,多是从一个时期(比如年、月)总体去研究人类活动对水循环的影响,很少涉及这个时期具体时段的人类影响行为。本文以满足水田各个生育期的灌水深度和蒸散发量为目标来进行水田耕作过程中的人类活动。具体水田管理方式为,当水田周围的河道和坡面来水量不满足水稻生育期适宜水深时,抽

取地下水使其水深达到适宜水深。在实地调查、向当地水稻种植主管部门咨询和综合分析学者的研究成果^[12,19-20]的基础上,得到建三江地区水稻各生育期最适宜水深(表 2)和蒸散发量(表 3)。表 3 中 E0 表示水面蒸发量,(E0,2.68)表示蒸发按 E0 和 2.68 mm 中的大值进行。

表 2 水稻生育期划分及最适宜水层

Tab.2 Division of rice growth stage and most suitable water layer

mm

参数	生育期									
	泡田 (5月1—15日)	插秧 (5月16—31日)	返青 (6月1—7日)	分蘖初 (6月8—14日)	分蘖末 (6月15—30日)	晒田 (7月1—2日)	拔节孕穗 (7月3—31日)	抽穗期 (8月1—14日)	乳熟期 (8月15—20日)	黄熟期 (8月21日—)
适宜水层	20~30	10~30	20~30	30~50	20~30	0	10~30	10~20	10~20	0
计算水深	25	20	25	40	25	0	20	15	15	0

表 3 水稻生育期蒸发表

Tab.3 Evaporation capacity at different growth stage of ricmm

mm

参数	生育期									
	泡田 (5月1—15日)	插秧 (5月16—31日)	返青 (6月1—7日)	分蘖初 (6月8—14日)	分蘖末 (6月15—30日)	晒田 (7月1—2日)	拔节孕穗 (7月3—31日)	抽穗期 (8月1—14日)	乳熟期 (8月15—20日)	黄熟期 (8月21日—)
蒸发表	E0	E0	(E0,2.68)	(E0,9.61)	(E0,9.61)	E0	(E0,7.20)	(E0,4.79)	(E0,1.85)	2.35

3 模型参数选取及验证

挠力河流域菜咀子站集水区域内雨量站比较多,为了能控制降雨量空间分布,选取红卫、岚峰、宝密桥、龙头等 30 个雨量站控制面雨量分布。由于本地区蒸发站比较少,选取菜咀子和宝清 2 个站。流量站选取宝清、保安和红旗岭 3 个站。经率定的挠力河流域参数见表 4,由率定参数对宝清

水文站发生的 7 场洪水进行验证结果见表 5。参加验证的 7 场次洪的径流相对误差的绝对值为 2.73%~8.33%,平均值为 5.53%;洪峰流量拟合的绝对值为 2.49%~10.47%,平均值为 5.01%。洪水过程线确定性系数为 0.67~0.86,平均值为 0.75,能较好再现流域径流过程。宝清、保安和红旗岭 3 站集水区域外其他区域的水文参数取表 4 各参数的均值。

表 4 经率定的挠力河流域参数

Tab.4 Hydrological parameters after calibration

流域出口站名	$D_1/(m^2 \cdot min^{-1})$	下渗模型参数	饱和导水率	根系区最大缺水/m	$D_k/(m^2 \cdot min^{-1})$	$c_k/(m \cdot s^{-1})$
保安	0.5	0.016	1.67	0.070	3.90	2.56
红旗岭	0.6	0.014	1.57	0.065	3.90	2.56
宝清	0.9	0.012	1.34	0.060	4.54	2.56

表 5 宝清水文站次洪模拟误差统计

Tab.5 Individual flood simulation error statistics of Baoqing hydrological station

洪号	降雨量/ mm	实测径流/ mm	计算径流/ mm	径流相对 误差/%	实测洪峰/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	计算洪峰/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	相对 误差/%	确定性 系数
820329	43.40	26.20	24.20	7.63	47.1	43.3	8.07	0.67
830425	210.70	45.10	48.10	6.65	138.1	132.0	4.42	0.77
840401	97.40	39.40	41.10	4.31	63.0	61.2	2.86	0.78
850405	80.70	44.00	45.20	2.73	52.6	54.5	3.61	0.73
860825	187.60	20.40	22.10	8.33	27.7	30.6	10.47	0.67
870626	129.10	97.04	93.07	4.09	88.4	86.2	2.49	0.74
890714	122.60	91.76	87.18	4.99	188.1	194.1	3.19	0.86

4 种植结构变化对水循环过程的影响

农业种植结构改变过程中人为因素的影响比较多,难于全面反映,而对于挠力河流域农田活动中最能体现人类活动的是水田的灌溉。模拟的土地结构为挠力河流域2013年土地结构,即有水田布局情况(图3~10简称为2013年有水田)。将1990年土地结构视为无水田情况(图3~10简称为1990年无水田)。利用1974—1990年间的降雨径流资料率定好的基于LBM法的TOPMODEL参数进行模拟。降雨和蒸发数据为1974—1990年的多年平均日降雨量和日蒸发量。

4.1 对根系区缺水量的影响

由模型模拟的两种情况下流域根系区缺水量(RZ,根系区含水率距田间持水量的差值)随时间变化过程见图3。横坐标为从5月1起的时间点。由图3可得,从5月1日到10月31日的184 d内根系

区总缺水量从1 231 mm减少到1 103 mm,降幅达10.5%。说明种植水田后整个流域的根系区缺水量明显减少。由图3可得,两种情况模拟的根系区缺水量差值最大的一天为第73天。绘制第73天的根系区缺水量见图4。从图4可得,根系区缺水量差值大的地方主要在水田处。为了更明确显示图4a、4b相同位置的根系区缺水量差值量,绘制图4c。从图4可发现缺水量差值大的地方为改水田前缺水量大的耕地。

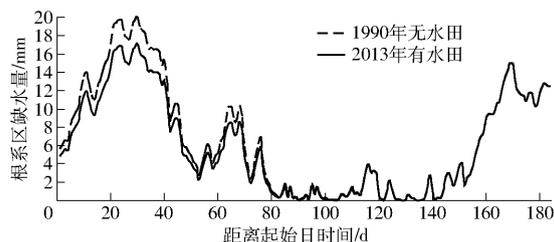


图3 根系区缺水随时间变化曲线

Fig. 3 Variation curves of water deficit with time in root zone

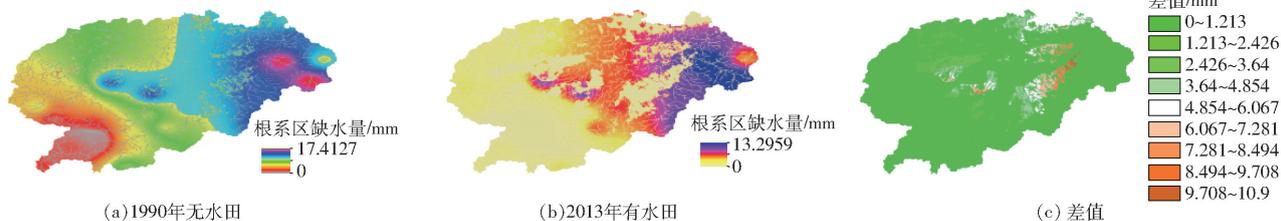


图4 水田不同覆盖情况下的第73天根系区缺水量对比

Fig. 4 Comparison of D73 RZ of different paddy farmland areas

4.2 对蒸散发量的影响

不同水田情况下人类活动对蒸散发量的影响如图5所示。图5的横坐标为从5月1日起的时间点。由计算得无水田情况5月到10月蒸散发量为483 mm,基于2013年的水田情况模拟的蒸发量为526 mm,增加量为8.9%。可得种植水田后流域蒸散发量增大了,增量比较明显时间段为从6月1日到8月15日。由表3可得,从6月1日到由8月15日正是水稻田蒸散发量明显大于水面蒸发量时期。以图5蒸散发量差值最大的第40天为例,绘制水田不同覆盖情况下的蒸散发对比图,如图6所示。从图6可得蒸散量从3.471 92 mm增加到9.61 mm,由表3可知,9.61 mm是水稻田分蘖初的蒸散发量。由图6c可得,种植水田处的日蒸散发量与无水田情况下的日蒸散发量之差最大为5.542 54 mm。

4.3 对非饱和和带缺水量的影响

由模型计算的两种情况下184 d的日平均降雨强度作用下挠力河流域的非饱和带带水量(SBAR,即非饱和带含水率距田间持水量的差值)随时间变

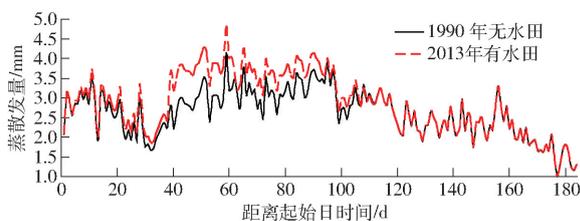


图5 不同水田耕地情况下人类活动对蒸散发量的影响

Fig. 5 Influence of cultivation activity on evaporation under different paddy farmland conditions

化过程见图7。以第5天为例绘制两种情况下的非饱和带带水量空间分布如图8所示。由图7、8可以得出,种植水稻后非饱和带带水量减少非常明显,带水量减少量最大为10.01 mm。由图7可看出,在第61天和第62天带水量出现增加现象,对比表2和表3发现这两天是水稻的晒田时期,下渗量减少,致使带水量产生了一个增加过程。由图7可以得出,种植水田后非饱和带带水量减小,而在水稻黄熟期后稻田不需要灌水,下渗量减小,使非饱和带带水量逐渐向无水田情况接近。

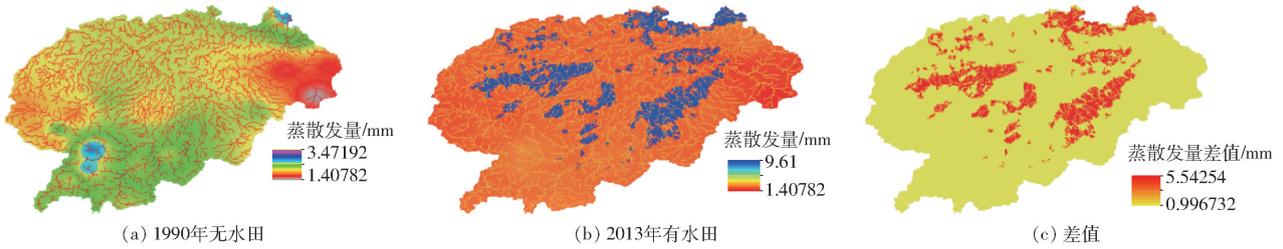


图 6 水田不同覆盖情况下的蒸散发量对比

Fig. 6 Comparison of evaporation of different paddy farmland areas

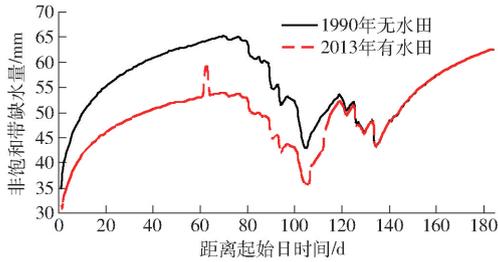


图 7 非饱和带缺水量随时间变化过程

Fig. 7 Variations of water deficit with time in unsaturated zone

4.4 对地表水量的影响

由模型模拟的流域地表水量随时间变化过程见图 9, 图 9 的纵坐标为流域地表总水量除以流域面积得到的以 mm 计的水量。图 10a 为第 5 天有水田布局计算的坡面地表水量 (EXpomian) 减去无水田布局计算的坡面地表水量差, 图 10b 为河网 (Hew) 地表水量差值。由图 9 可得, 流域种植水田后引起 5 月到 10 月流域地表水量明显减少, 由无水田的水深 3 008 mm 降低到有水田的 1 700 mm, 减少量达



图 8 不同覆盖情况下的非饱和带缺水量对比

Fig. 8 Comparison of water deficit in unsaturated zone of different paddy farmland areas

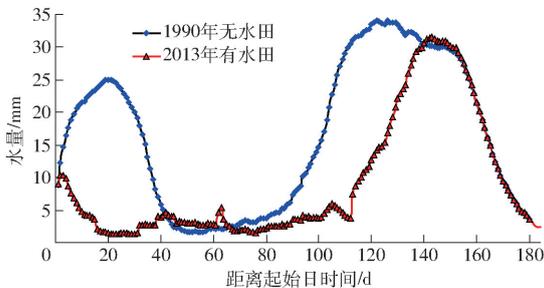


图 9 不同布局情况地表水量随时间变化过程

Fig. 9 Variations of surface water with time in different layouts

于水面蒸发量, 因此有水田布局情况下流域地表水量呈现图 9 所示的曲线趋势: 从 5 月 1 日开始进入水稻用水时期后, 大量引河道中水, 地表水量下降明显; 第 40 天后地表水比较少时, 开始抽取地下水, 地表水量开始进入一个稳定时期; 第 70 天后水稻收获后地表水量逐渐恢复到没有种植水田情况时的水量。由表 3 可得, 水田耕作 70 d 后蒸散发量呈现下降的趋势, 向水面蒸发量靠近, 流域上由水田引起的地表水量减少达到最大值, 地表水量呈现增加趋势, 这在图 9 的第 73 天以后的曲线走势得以体现。

4.5 对水循环过程的综合影响

为了进一步分析种植水田后对整个流域水循环过程的影响, 绘制了有水田与无水田情况对水循环

43%。虽然种植水稻处稻田坡面水量增加 (图 10a), 但由于引水灌溉水田致使下游河网水量下降 (图 10b), 再加上由于水田的蒸散发量大于等

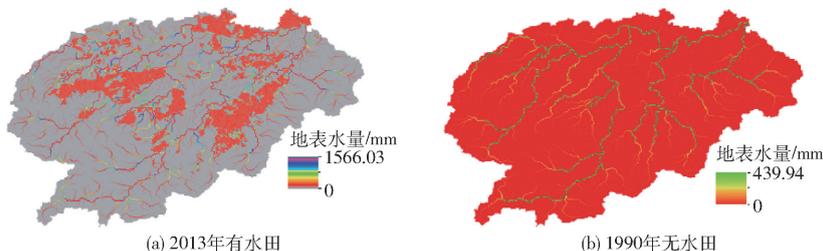


图 10 不同覆盖情况下第 5 天地表水量差值对比

Fig. 10 Comparison of D5EX difference of different paddy farmland areas

综合影响分析图,如图 11 所示。图 11 共记录 7 类数据:其中的 SUMP 为流域日降雨量;E 差值、RZ 差值、入根系区水量差值、出根系区水量差值、SBAR 差值和 RG 差值分别为 2013 年水田种植情况下计算的流域蒸散发量、流域根系区缺水量、渗入流域根系区水量、流出根系区渗入到非饱和带水量、非饱和带缺水量和地下径流量减去无水田情况计算的相应值。由图 11 分析得,变化量绝对值幅度从大到小的顺序为 SBAR 差值、RZ 差值、E 差值、入根系区水量差值、出根系区水量差值和 RG 差值,其中入根系区水量差值和出根系区水量差值接近。水田灌溉水时,从地表向地下径流运动过程中垂向流速远大于

水平向流速,并且根系区缺水量比较少,因此入根系区水量差值和出根系区水量差值接近。由水流垂向运动规律可知,灌溉水影响这 6 种量的顺序为根系区水量、蒸发量、进入根系区水量、流出根系区水量、非饱和带缺水量和地下径流量。因此可解释图 11 中的根系区水量、蒸发量、进入根系区水量、流出根系区水量和地下径流量的变化幅度顺序。非饱和带缺水量变化大的原因是因为水田灌溉水垂向补水非饱和带和灌溉水下渗的上游网格的来水补充,这两种水流流动导致非饱和带缺水量变化大。地下径流量变化幅度小的原因是水田灌溉水增加的地下水在流动过程中被非饱和带吸收了大部分。

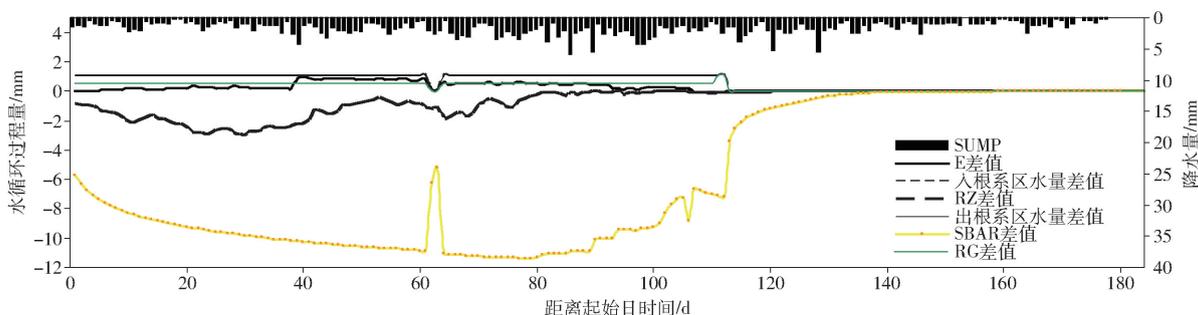


图 11 不同覆盖情况对水循环综合影响分析

Fig. 11 Comprehensive analysis of effect of paddy farmland area on water cycle

5 结论

(1) 挠力河流域主要土地类型为林地、耕地和少量的草地。从 1990—2013 年间的土地类型数据分析得:林地和草地面积基本不变化,主要是未利用地和旱地向水田转变,水田耕地面积由 1990 年的 19.65 万 hm^2 增加到 2013 年的 53.66 万 hm^2 ,年均增长率 7.52%。

(2) 基于 LBM 法构建的 TOPMODEL 模型对挠力河流域的降雨径流过程取得了较好的模拟精度,可以描述水循环过程变量的空间分布情况。

(3) 在两期土地利用状况和多年平均日降雨情

况下,挠力河流域由于种植水田导致 5 月到 10 月间的流域总蒸散发量增加、根系区缺水减少、非饱和带缺水量减少、地表水量减少、地下水量增加。其中蒸散发增幅达 8.9%。水田蒸散发量大的分蘖期对流域蒸散发影响明显。根系区缺水减少,降幅达 10.5%,地表水量减少达 43%。水田对水文情势的影响差异体现在水稻生育期的差异上,分蘖期对蒸散发量、根系区缺水和非饱和带缺水量影响较大。

(4) 水田灌溉对水循环的过程影响按变化幅度从大到小的顺序为 SBAR 差值、RZ 差值、E 差值、入根系区水量差值、出根系区水量差值和 RG 差值,其中入根系区水量差值和出根系区水量差值接近。

参 考 文 献

- 徐静,任立良,刘晓帆,等.老哈河流域土地覆被变化水文响应模拟研究[J].资源科学,2011,33(6):1099-1105.
XU Jing, REN Liliang, LIU Xiaofan, et al. Simulations of hydrologic response to land cover change in the Laohahe watershed in northern China[J]. Resources Science, 2011, 33(6):1099-1105. (in Chinese)
- FOLEY J A, DEFRIES R, ASNER G P, et al. Global consequences of land use[J]. Science, 2005, 309(5734):570-574.
- DeFRIES R, ESHIEMAN K N. Land-use change and hydrologic process: a major focus for the future[J]. Hydrological Processes, 2004, 18(11):2183-2186.
- 陈莹,许有鹏,尹义星.基于土地利用/覆被情景分析的长期水文效应研究——以西苕溪流域为例[J].自然资源学报, 2009, 24(2):351-359.
CHEN Ying, XU Youpeng, YIN Yixing. Simulation of the hydrologic response to land-use and land-cover changes scenarios: a case study of Xitiao River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(2):351-359. (in Chinese)
- 史晓亮,杨志勇,严登华,等.滦河流域土地利用/覆被变化的水文响应[J].水科学进展,2014,25(1):21-27.
SHI Xiaoliang, YANG Zhiyong, YAN Denghua, et al. On hydrological response to land-use /cover change in Luanhe River Basin

- [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(1): 21–27. (in Chinese)
- 6 欧春平, 夏军, 王中根, 等. 土地利用/覆被变化对 SWAT 模型水循环模拟结果的影响研究——以海河流域为例[J]. *水力发电学报*, 2009, 28(4): 124–129.
OU Chunping, XIA Jun, WANG Zhonggen, et al. LUCC influence on SWAT hydrological simulation a case study of Haihe River Basin[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 28(4): 124–129. (in Chinese)
- 7 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.
HAO Fanghua, CHEN Liqun, LIU Changming, et al. Impact of land use change on runoff and sediment yield[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 5–8. (in Chinese)
- 8 董磊华, 熊立华, 于坤霞, 等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J]. *水科学进展*, 2012, 23(2): 278–285.
DONG Leihua, XIONG Lihua, YU Kunxia, et al. Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(2): 278–285. (in Chinese)
- 9 李丽娟, 姜德娟, 李九一, 等. 土地利用/覆被变化的水文效应研究进展[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(2): 211–224.
LI Lijuan, JIANG Dejuan, LI Jiuyi, et al. Advances in hydrological response to land use/land cover change[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(2): 211–224. (in Chinese)
- 10 PIKOUNIS M, VARANOU E, BALTAS E, et al. Application of the SWAT model in the Pinios River Basin under different land-use scenarios[J]. *Global Nest: The International Journal*, 2003, 5(2): 71–79.
- 11 周浩, 雷国平, 张博, 等. 1990—2013 年挠力河流域耕地变化下水土资源平衡效应分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(1): 272–280.
ZHOU Hao, LEI Guoping, ZHANG Bo, et al. Farmland change induced land and water resource balance in Naoli River Basin from 1990 to 2013[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(1): 272–280. (in Chinese)
- 12 王韶华, 刘文朝, 刘群昌. 三江平原农业需水量及适宜水稻种植面积的研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(4): 50–53.
WANG Shaohua, LIU Wenchao, LIU Qunchang. Agricultural water consumption and suitable paddy rice plant areas of the Three-River-Plain[J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(4): 50–53. (in Chinese)
- 13 任守德, 付强, 王凯. 基于宏微观尺度的三江平原区域农业水土资源承载力[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 8–14.
REN Shoude, FU Qiang, WANG Kai. Regional agricultural water and soil resources carrying capacity based on macro-micro scale in Sanjiang Plain[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(2): 8–14. (in Chinese)
- 14 刘正茂, 吕宪国, 夏广亮, 等. 近 50 年挠力河流域上游径流深变化过程及其驱动机制研究[J]. *水文*, 2011, 31(3): 44–50.
LIU Zhengmao, LÜ Xianguo, XIA Guangliang, et al. Runoff depth variation process of upper reaches of Naoli River Basin and its driving mechanism in recent 50 years[J]. *Journal of China Hydrology*, 2011, 31(3): 44–50. (in Chinese)
- 15 张惠斌, 于东, 姚章村. 论“打井种稻”与“循环经济”[J]. *水利科技与经济*, 2006, 12(12): 819–821.
ZHANG Huibin, YU Dong, YAO Zhangcun. Talk about “planting rice by constructing well for irrigation” and “cycle economy”[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2006, 12(12): 819–821. (in Chinese)
- 16 宫兴龙, 芮孝芳, 付强, 等. 基于格子玻尔兹曼方法的流域汇流数值模型[J]. *水力发电学报*, 2014, 33(2): 12–17.
GONG Xinglong, RUI Xiaofang, FU Qiang, et al. A numerical model of watershed concentration based on lattice boltzmann method[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(2): 12–17. (in Chinese)
- 17 宫兴龙, 付强, 邢贞相, 等. 基于格子玻尔兹曼法的 TOPMODEL 建模与应用[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 181–186. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150726&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.026.
GONG Xinglong, FU Qiang, XING Zhenxiang, et al. Modelling and application of TOPMODEL based on LBM [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 181–186. (in Chinese)
- 18 宫兴龙, 付强, 王斌, 等. 丘陵-平原-湿地复合区降雨径流数值模型[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(11): 142–149. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161119&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.019.
GONG Xinglong, FU Qiang, WANG Bin, et al. Numerical model of rainfall runoff in Hills-Plain-Wetland compound area[J/OL]. *Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(11): 142–149. (in Chinese)
- 19 彭世彰, 艾丽坤, 和玉璞, 等. 稻田灌排耦合的水稻需水规律研究[J]. *水利学报*, 2014, 45(3): 320–325.
PENG Shizhang, AI Likun, HE Yupu, et al. Effect of irrigation and drainage coupling management on rice water requirement[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(3): 320–325. (in Chinese)
- 20 朱士江, 孙爱华, 张忠学. 三江平原不同灌溉模式水稻需水规律及水分利用效率试验研究[J]. *节水灌溉*, 2009(11): 12–14.
ZHU S J, SUN A H, ZHANG Z X. Experimental research on water consumption law and water using efficiency of paddy under different irrigation mode Sanjiang Plain[J]. *Water Saving Irrigation*, 2009(11): 12–14. (in Chinese)