

土地利用方式对平原—丘陵—湿地交融区水资源的影响

官兴龙 付强 邢贞相 关英红 王斌 李茉

(东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 近年来三江平原的平原—丘陵—湿地交融区土地利用方式变化显著,造成地下水水位下降、水资源紧缺等问题,然而揭示该区土地利用方式变化对水资源影响的报道较少,且难于精准描述地表、地下、湿地和绿水等水资源量时空变化。本文联合基于格子波尔兹曼法的分布式 TOPMODEL 和湿地水流运动模型构建平原—丘陵—湿地交融区水文模型,利用 GIS 和 RS 技术,结合地学信息图谱与空间自相关方法,分析了挠力河流域土地利用方式变化及其对水资源量影响。结果表明:根据耕地面积变化和动态度分布得 1990—2013 年间挠力河流域草地和林地面积变化不大,旱地面积轻微下降;挠力河流域中部与北部区域生产条件优越的未利用地和旱地转为水田;土地利用方式变化对水资源影响由强到弱的顺序为灌溉水田抽取地下水量、绿水储量、径流深、绿水流量、补给地下水量;水稻田不同生育期蒸发量不同,造成了挠力河流域 5—6 月期间绿水流量增加、绿水储量减少、径流深减少、补给地下水量增加和灌溉水田抽取地下水量增加等趋势,7—8 月期间这一增加趋势逐渐减弱,8 月后这一趋势结束;水田密集区域绿水流量大,绿水储量和径流深减少,而补给地下水量和灌溉水田抽取地下水量增加。

关键词: 水资源; 平原—丘陵—湿地交融区; 土地利用方式; 绿水

中图分类号: TV211; F301.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)06-0254-09

Influence of Land Use on Water Resources in Plain – Hill – Wetland Blend Area

GONG Xinglong FU Qiang XING Zhenxiang GUAN Yinghong WANG Bin LI Mo

(College of Water Conservancy and Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Land use of plain – hill – wetland blend area in Sanjiang Plain was changed significantly, resulting in the decline of groundwater level and shortage of water resources, while rare research was focused on revealing the effect of land use change on water resources, especially on the temporal and spatial distribution of water resources of surface water and ground water, wetland water and green water. A plain – hill – wetland blend area hydrological model was constructed based on distributed TOPMODEL and wetland flow kinematic model. The land use change and its impact on water resources in Naolihe River Basin was analyzed by using GIS and RS technology, combined with the geo information and spatial autocorrelation method. The results showed that the areas of grassland and woodland in the Naolihe River basin were changed little, while dry land area was decreased slightly according to the change of cultivated land area and dynamic degree distribution between 1990 and 2013; unused land and dry land with advantageous conditions for production was converted to paddy field in the central and northern areas of Naolihe River Basin; The influence of land use change on water resources declined in the order of withdraw water quantity, green water reserves, runoff flow, green water flow, and groundwater recharge; the evaporation capacity of paddy field was different in different rice growth periods, which led to the increase of green water flow, decrease of green water reserves, decrease of runoff flow, increase of groundwater recharge and increase of withdraw water quantity during May and June in Naolihe River Basin. The difference of these items was decreased gradually during July and August, and disappeared after August. Green water flow was increased, green water reserves and runoff flow were decreased, while groundwater recharge and withdraw water quantity were increased in paddy field.

Key words: water resource; plain – hill – wetland blend area; land use; green water

收稿日期: 2018-02-22 修回日期: 2018-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51109036,51408107)和黑龙江省科学基金项目(E2017009)

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: 邢贞相(1976—),男,副教授,博士,主要从事水文水资源不确定性分析研究,E-mail: zxxing@neau.edu.cn

0 引言

近几十年来全球环境变化对人类的生存和发展产生了严重威胁,未来多数地区将出现降雨量减少而蒸发量增加的现象^[1-3],对我国北方地区农业生产和生态环境造成了巨大的影响^[4]。首先是对水资源的影响,而在影响水资源的因素中,土地利用/覆被变化(LUCC)对区域水资源的影响不可忽视,其影响着水循环过程中的蒸散发、下渗速率、土壤含水率、地面水流及地下水流等要素的时空分布,进而改变水资源量的时空分布特征^[5]。三江平原处欧亚大陆东端的中高纬度地区,自 1990 年以来进入降水略减少和干旱较多发阶段^[2,6-7]。三江平原地区所在政府及农户为应对全球气候变化导致水资源量减少的策略之一,就是调整优化耕地结构布局发展水田,但也产生了湿地基质逐渐变为农田基质,林地湿地退缩,草地和未利用地几乎被耕地所替代^[7],致使流域涵养水源减少,加速降雨转化为径流,从而更加剧了水资源短缺情况。学者围绕土地利用/覆被变化对水文过程、水文响应和水资源等方面进行大量有价值的研究,如将土地利用情景模式作为输入,分析土地利用变化对水文过程的影响,来探索分析土地利用变化对水文响应的影响^[8-10];从水土资源承载能力与匹配视角运用水土资源承载力评价体系、水土资源平衡方法和水土资源匹配指数法等方法分析了研究区的水土资源空间匹配格局及其承载力^[11-13];气候和土地利用同时变化对流域水资源的影响^[14];随着工农业发展,水资源短缺越来越严重,绿水水资源被更多学者认可,在分析土地利用变化对绿水水资源影响方面,学者进行了一定的研究^[15-17]。

虽已有较为系统和深入研究土地利用/覆被变化对水资源的影响,但在平原-丘陵-湿地交融区,从时空角度反映农业结构变化对水资源影响的研究成果比较少,还存在进一步研究的必要:①在描述平原-丘陵-湿地交融区水循环过程使用的水文模型大多采用集总式或基于集总式的分散水文模型,难于描述土地结构时空变化对水文过程量时空的影响。②采用基于物理基础的分布式水文模型描述交融区水循环过程时,由于参数过多难于率定,应用不广。③绿水的研究多将流域作为一个整体来定量划分蓝水绿水,难于准确描述绿水蓝水时空分布^[18-20]。

因此,本文以三江平原地区的挠力河流域为研究对象,选用通用的土地利用动态度模型,确定空间化处理尺度,研究流域土地利用变化特征,探讨其异质性规律,并对流域进行分区,分析土地利用变化情况。联合基于格子波尔兹曼法(LBM)的分布式

TOPMODEL^[21-22]和湿地水流运动模型构建平原-丘陵-湿地交融区水文模型,利用 GIS 和 RS 技术,结合地学信息图谱与空间自相关方法,分析挠力河流域土地利用方式变化对水资源量影响,以期为平原-丘陵-湿地交融区土地利用和水资源管理提供决策支持和科学依据。

1 平原-丘陵-湿地交融区水文模型构建

在构建平原-丘陵-湿地交融区水文模型时将研究区域分为平原-丘陵区 and 湿地区分别构建模型,之后在交界处栅格(Grid)上将两个模型耦合起来。

1.1 平原-丘陵区水文模型构建

在构建平原-丘陵区产汇流过程时,采用基于 LBM 改进了 TOPMODEL 的汇流和非饱和带土壤水运移模块,在栅格上对各模块进行松散耦合构建基于 LBM 的分布式 TOPMODEL^[23-25],可通过调整栅格大小来改变描述产汇流的时空过程尺度。

1.2 湿地运动模型构建

1.2.1 湿地水流运动方程

湿地水流运动方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{l^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} u - fv = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + g \frac{l^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} v + fu = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 h ——水深
 $u、v$ ——水平和垂直方向的流速
 z ——水位
 l ——曼宁糙率系数
 f ——柯氏系数

式(1)采用贴体坐标变换的方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{J} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (g_{\eta} u h) + \frac{\partial}{\partial \xi} (g_{\xi} v h) \right] = 0 \\ \frac{\partial u^*}{\partial t} + \frac{u^*}{g_{\xi}} \frac{\partial u^*}{\partial \xi} + \frac{v^*}{g_{\xi}} \frac{\partial u^*}{\partial \eta} + \frac{v^* u^*}{J} \frac{\partial g_{\xi}}{\partial \eta} - \frac{(v^*)^2}{J} \frac{\partial g_{\eta}}{\partial \xi} + \frac{g l^2 u^* \sqrt{(u^*)^2 + (v^*)^2}}{h^{4/3}} - f v^* + \frac{g}{g_{\xi}} \frac{\partial z}{\partial \xi} = 0 \\ \frac{\partial v^*}{\partial t} + \frac{u^*}{g_{\xi}} \frac{\partial v^*}{\partial \xi} + \frac{v^*}{g_{\eta}} \frac{\partial v^*}{\partial \eta} + \frac{v^* u^*}{J} \frac{\partial g_{\eta}}{\partial \xi} - \frac{(u^*)^2}{J} \frac{\partial g_{\xi}}{\partial \eta} + \frac{g l^2 v^* \sqrt{(u^*)^2 + (v^*)^2}}{h^{4/3}} + f u^* + \frac{g}{g_{\eta}} \frac{\partial z}{\partial \eta} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 $u^*、v^*$ ——坐标变换后坐标轴 $\xi、\eta$ 方向水流流速

$g_{\xi}、g_{\eta}$ ——离散网格 $\xi、\eta$ 方向的网格长度
 J ——变换量

1.2.2 离散方程

采用交错网格进行离散研究区域时,式(2)连续方程的离散方程形式为

$$A_{1,k}z_{2k-1} + B_{1,k}z_{2k+1} + C_{1,k}z_{2k+3} + D_{1,k}v_{2k+1} + E_{1,k}u_{2k} + F_{1,k}u_{2k+2} = H_{1,k} \quad (k = 1, 2, \cdots, m)$$

式中 m —— x 方向离散网格数

z_{2k-1} —— $2k-1$ 断面离散点水位矩阵

v_{2k+1} —— $2k+1$ 断面离散点 v 矩阵

u_{2k} —— $2k$ 断面离散点 u 矩阵

$A_{1,k}、B_{1,k}、C_{1,k}、D_{1,k}、E_{1,k}、F_{1,k}$ 和 $H_{1,k}$ 为离散矩阵。

式(2)动量方程的离散形式为

$$\begin{cases} A_{2,k}z_{2k-1} + B_{2,k}z_{2k} + C_{2,k}u_{2k-2} + D_{2,k}u_{2k} + E_{2,k}u_{2k+2} + F_{2,k}v_{2k-1} + G_{2,k}v_{2k+1} = H_{2,k} \\ A_{3,k}z_{2k+1} + B_{3,k}u_{2k} + C_{3,k}u_{2k+2} + D_{3,k}v_{2k-1} + E_{3,k}u_{2k+1} + F_{3,k}v_{2k+3} = H_{3,k} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $A_{2,k}、A_{3,k}、B_{2,k}、B_{3,k}、C_{2,k}、C_{3,k}、D_{2,k}、D_{3,k}、E_{2,k}、E_{3,k}、F_{2,k}、F_{3,k}、H_{2,k}、H_{3,k}$ 为离散矩阵。

1.2.3 回代求解

在求解追赶方程基础上,可建立垂向网格断面流速 $u、v$ 和水位 z 的回代矩阵

$$\begin{cases} u_{2n} = C_{IA2,2n}Z_1 + C_{IB2,2n}Z_2 + C_{k2,2n} \\ z_{2n-1} = C_{IA1,2n-1}Z_1 + C_{IB1,2n-1}Z_2 + C_{k1,2n-1} \\ v_{2n-1} = C_{IA3,2n-1}Z_1 + C_{IB3,2n-1}Z_2 + C_{k3,2n-1} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $Z_1、Z_2$ ——研究区域上游首断面和下游末断面水位

$C_{IA2,2n}、C_{IB2,2n}、C_{k2,2n}、C_{IA1,2n-1}、C_{IB1,2n-1}、C_{k1,2n-1}、C_{IA3,2n-1}、C_{IB3,2n-1}、C_{k3,2n-1}$ 为回代矩阵。

固壁边界处速度梯度极为陡峭,采用密集网格,应用不穿透条件即速度法向方向分量为零。

2 研究区域概况

挠力河流域位于中国东北部边陲的三江平原腹地佳木斯市境内,汇入乌苏里江,如图 1 所示。流域内地势平坦,土质肥沃,水土资源丰富,分布着五九七、八五二和八五三等多个农场,是我国粮食主产区。挠力河流域降雨量比较丰富、热量适中、夏季日照充足,是水稻、玉米和豆类等农作物的适宜生长区。地下水资源丰富,地下水水位距离地表比较近,水温较高,适宜抽取地下水灌溉农田。近些年来抽取地下水灌溉的水稻田面积急剧增长,产生了地下水位下降、湿地退化等一系列问题。解决这些问题的首要前提是研究挠力河流域土地利用方式变化对水循环过程和资源量的影响。利用 SRTM 数据获得

3sDEM 数据,通过填注、识别流向和提取水系等步骤获得挠力河水系,如图 1 所示。



图 1 挠力河流域位置图

Fig.1 Location of Naolihe River Basin

2.1 土地利用方式变化分析

挠力河流域菜咀子站汇流区域 1990 年和 2013 年的 2 期 LUCC 信息如图 2、3 所示。为了反映从 1990 年至 2013 年间土地利用类型变化情况,绘制了土地变化的动态度^[26],如图 4 所示。由图 2~4 可知,1990 年至 2013 年期间挠力河流域土地利用发生了比较大的变化,水田面积扩大,未利用地基本得到利用,旱地面积轻微下降,草地和林地面积基本不变。

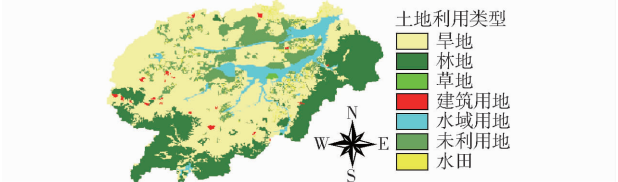


图 2 1990 年土地利用图

Fig.2 Land use map in 1990

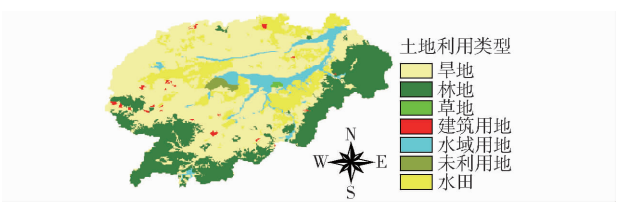


图 3 2013 年土地利用图

Fig.3 Land use map in 2013

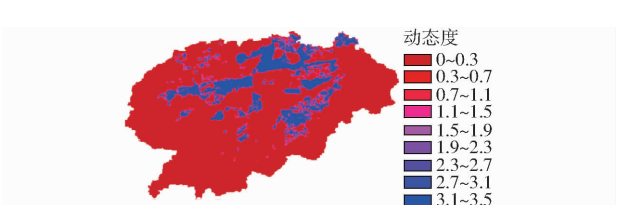


图 4 动态度分布

Fig.4 Kinetic degree distribution

2.2 流域分区情况

由图 2~4 可知,土地利用方式变化是一个空间问题,如果以全流域作为一个整体去研究土地利用方式对水资源影响,难于描述清楚水资源量时空变化。挠力河流域作为一个封闭的流域,由子流域(或集水区)构成,而子流域除了出口与子流域外有联系,子流域内部水文循环完整且系统。因此选取子流域来探寻集水区土地利用方式变化对流域水资源量空间分布的影响。在经过提取汇水面积累积矩阵、提取河网、河网分级和提取流域地貌特征等步骤后获得的挠力河分区如图 5 所示,将流域划分为 110 个流域分区。

2.3 水稻田生育期水深管理

根据实地走访农户、文献资料分析^[27-29]、查阅

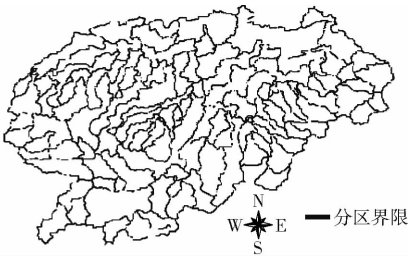


图 5 挠力河流域分区

Fig. 5 Zones of Naolihe River Basin

农场开发可行性研究报告和向建三江地区水稻生产主管部门咨询,得到研究区水稻管理制度,其具体管理方式见表 1 和表 2。表 1 中的适宜水深为水稻生育期稻田水深范围,表 2 中的 E0 为水面蒸散发量,(E0,2.68)表示水稻生长期蒸散发量取水面蒸散发量和 2.68 mm 中的大值。

表 1 水稻田生育期水深管理

Tab. 1 Water depth during rice growth period mm

参数	生育期									
	泡田	插秧	返青	分蘖初	分蘖末	晒田	拔节孕穗	抽穗期	乳熟期	黄熟期
	(5 月 1—15 日)	(5 月 16—31 日)	(6 月 1—7 日)	(6 月 8—14 日)	(6 月 15—30 日)	(7 月 1—2 日)	(7 月 3—31 日)	(8 月 1—14 日)	(8 月 15—20 日)	(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 2 水稻田生育期蒸发量

Tab. 2 Evaporation during rice growth period mm

生育期	泡田	插秧	返青	分蘖初	分蘖末	晒田	拔节孕穗	抽穗期	乳熟期	黄熟期
	(5 月 1—15 日)	(5 月 16—31 日)	(6 月 1—7 日)	(6 月 8—14 日)	(6 月 15—30 日)	(7 月 1—2 日)	(7 月 3—31 日)	(8 月 1—14 日)	(8 月 15—20 日)	(8 月 21 日—)
	E0	E0	(E0,2.68)	(E0,9.61)	(E0,9.61)	E0	(E0,7.2)	(E0,4.79)	(E0,1.85)	2.35

3 模型模拟与检验

根据 1974—1989 年的降雨、蒸发和径流等水文气象资料进行模型参数的率定和验证,率定非饱和带扩散系数取 0.67 m²/min,根系区最大蓄水量为 68 mm,河道扩散系数取 4.12 m²/min,波速取 2.56 m/s,曼宁糙率系数取 0.017。具体模型验证见文献[23-25]。

4 结果与分析

由于研究区为平原-丘陵-湿地交融的流域,其地表水包括平原和丘陵区域产生的水资源量,还包括湿地区域的水资源量。平原和丘陵区域地表径流是指其所在分区流域出口的地表水资源量。湿地区域地表水资源是指其所在流域区域储存的地表水资源量。流域地下水资源量是指降雨和湿地补给流域地下水的水量。FALKENMARK^[30]在 1995 年提出了绿水与蓝水的概念,绿水由实际蒸

散发量组成的绿水流和土壤中蓄水量组成的绿水储量 2 部分组成。种植水田区域在地表水不能满足水稻需水时,需抽取地下水灌溉水田,本文将这部分水量称为提水量,即灌溉水田抽取的地下水水量。

由研究区域概况可知挠力河流域土地利用方式变化主要是未利用地和旱田转为水田,因此本文设置 3 种情景来描述土地利用方式。情景 1 为 1990 年挠力河流域土地利用方式里的水田视为旱地,即稻田面积为 0 hm²,其他土地使用方式不变。情景 2 为 1990 年的土地利用方式,稻田面积 19.7 万 hm²。情景 3 为 2013 年的土地利用方式,稻田面积为 53.7 万 hm²。

降雨量、蒸发量和径流量采用 1974—1989 年 5—10 月多年平均日数据。从水稻田管理方式可以得出水田管理时间段为 15 日或半月。将每个月分为月上(月初 1—15 日)和月下(月末 16—30 日或 16—31 日)两个时间段。

4.1 土地利用方式变化对水资源量影响

利用水文气象数据和3种土地利用方式情景作为输入数据,由平原-丘陵-湿地交融区水文模型模拟得挠力河流域水资源量,如图6~8所示。模拟的时间为5—10月期间共12个时间段。图6~8的绿水流量、补给地下水量、径流深和绿水储量变化等曲线趋势基本相同,可知1990—2013年间流域整体水循环没有发生大的变化。相同的5—10月降雨量不同情景模式对水资源量影响如表3所示。由表3可知,土地利用变化对水资源影响按从强到弱顺序为提水量(灌溉水田抽取的地下水量)、绿水储量、径流深、绿水流量、补给地下水量。提水量从情景1的0 mm发展到情景2的3.2 mm,到情景3时已达20.5 mm,说明种植水稻时大量提取地下水。由表3可知,情景3模式下补给地下水量为39.2 mm,而此时提水量达20.5 mm,占补给量的52.3%。绿水储量变化由情景1的-9.9 mm到情景2的-9.9 mm,再增加到情景3的10.5 mm,可以发现绿水储量不一定随水田面积增加而增加。径流深影响比较大,情景3径流深相对情景1径流深减少达23.5%。绿水流量从情景1的375.8 mm增加到情景3的399.6 mm,增加了5.3%,增加不十分明显。补给地下水量由情景1的26.9 mm增加到情景3的39.2 mm。

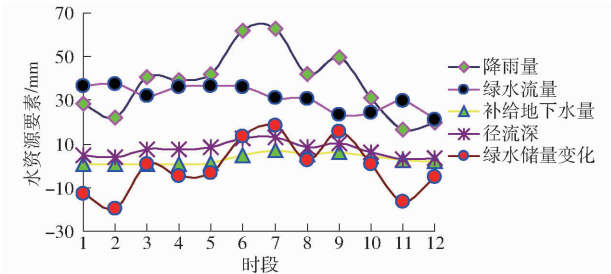


图6 情景1水资源要素

Fig. 6 Factors of water resources under condition 1

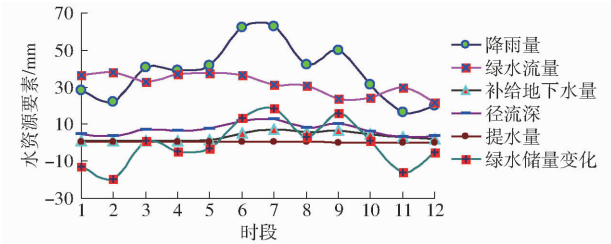


图7 情景2水资源要素

Fig. 7 Factors of water resources under condition 2

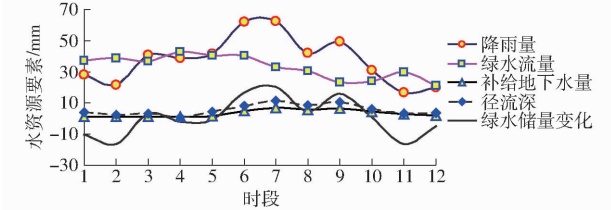


图8 情景3水资源要素

Fig. 8 Factors of water resources under condition 3

表3 5—10月3种情景模式计算的水资源量

Tab.3 Water resources calculated under three conditions from May to October							
情景	水田面积/ 万 hm ²	降雨量/ mm	绿水流量/ mm	补给地下水量/ mm	径流深/ mm	提水量/ mm	绿水储量变化/ mm
1	0	455.6	375.8	26.9	89.7	0	-9.9
2	19.7	455.6	379.5	37.8	86.1	3.2	-9.9
3	53.7	455.6	399.6	39.2	65.9	20.5	10.5

4.2 土地利用方式变化对绿水流量影响

为了反映水田变化对水资源量的影响,采用敏感性分析,见表4(表中数据为各时段情景1绿水流量与情景2及情景3绿水流量的百分比)。由表4可知,随着水田面积增加绿水流量增加明显,究其原因水稻生育期间稻田蒸发量大于等于水面蒸发量(表2)。由表4可知,绿水流量对土地利用变化敏感性随时间变化,5月上到6月下敏感性增强,到6月下敏感性最强,之后敏感性逐渐减弱,9月和

10月敏感性趋于零。为了找到绿水流量增加的原因,绘制敏感性最强的时段6月下情景1和情景3的绿水流量如图9~11。由图9可知,情景1计算的绿水流量最大值发生在降水丰富的挠力河下游部分。由图10可知,情景3绿水流量最大值均发生在水田处。由图11情景3相对于情景1敏感性分布图发现,种植水田后蒸发量增加明显,局部水田处增加量达163.7%,这说明6月下水田处的绿水流量比一般旱田大1.5倍左右。

表4 绿水流量对土地利用方式变化敏感性分析

Tab.4 Sensitivity analysis of green water flow to land use change

	时间段								
	5月上	5月下	6月上	6月下	7月上	7月下	8月上	8月下	9月上
情景2	0.96	2.66	3.71	2.78	2.22	1.22	0.21	-0.10	0
情景3	2.16	9.10	18.50	15.90	11.00	7.66	1.29	-0.70	0

%

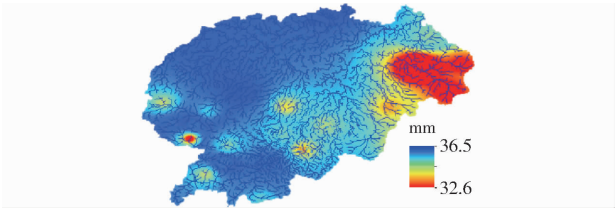


图 9 情景 1 绿水流量分布

Fig. 9 Green water distribution under condition 1

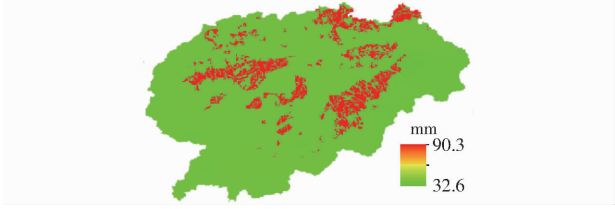


图 10 情景 3 绿水流量分布

Fig. 10 Green water distribution under condition 3

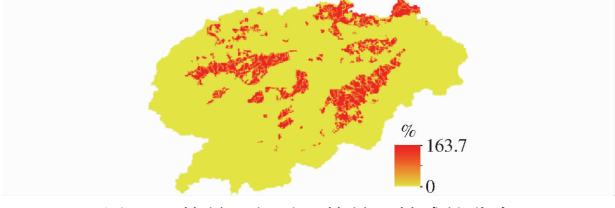


图 11 情景 3 相对于情景 1 敏感性分布

Fig. 11 Sensitivity distribution

4.3 土地利用方式变化对径流深影响

由表 5 可知,径流深对土地利用变化敏感性也是随着水稻生育期不同而不同,5—9 月期间的径流深随着水田面积增加而减少,9 月后水田变化对径流深影响趋于零。由表 2 可知,从 5 月泡田开始到

8 月水稻成熟期间水田蒸散发量大于等于水面蒸发量,水田面积越大流域蒸发越大,则其径流深越小,表 5 验证了这一规律。6 月下水田蒸散发量最大,径流深减小量达 20.46%。由表 4 和表 5 对比发现,水田面积增加对流域径流量影响大于对绿水流量影响。这是因为水田蒸发存在一个最大值,如表 2 分蘖初蒸发按照水面蒸发和 9.61 mm 中的大者进行。而在灌溉水稻时需要一定适宜水深,在水田水深达不到适宜水深时,先抽取地表水,地表水不足后再开采地下水,这时需用大量地表水。为了进一步分析水田分布对径流空间分布影响,绘制了 6 月下情景 3 径流深分布图,如图 12 所示。由表 5 发现,径流深对土地利用敏感性最强时期为 6 月下,但从图 12 可知,不同流域分区水田面积比例不同,影响径流程度不同。图 12 中部分分区径流深接近于零,即这些区域地表水全部进入水田。这些区域一定要特别注意水田面积不能再增加,而应适当调整农业结构减少水田面积,否则由于缺水生态环境将遭到破坏。

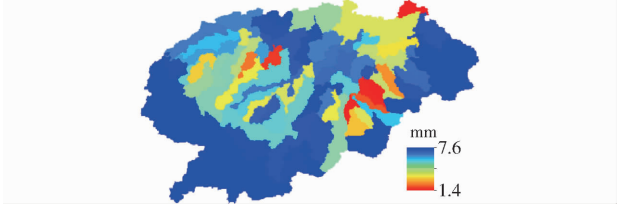


图 12 情景 3 径流深分布

Fig. 12 Runoff depth distribution under condition 3

表 5 径流深对土地利用方式变化敏感性分析

Tab. 5 Sensitivity analysis of runoff depth to land use change

	时间段									%
	5 月上	5 月下	6 月上	6 月下	7 月上	7 月下	8 月上	8 月下	9 月上	
情景 2	-0.88	-2.12	-2.69	-3.16	-2.10	-1.50	-0.61	0	0	
情景 3	-5.27	-12.49	-16.87	-20.46	-12.65	-9.47	-4.00	-0.02	0	

4.4 土地利用方式变化对湿地水资源量影响

由表 6 分析得,水田面积对湿地平均水深影响显著;水稻不同生育期湿地平均水深对土地利用变化敏感性不同,5 月水田抽取地表水和地下水,水田开始对湿地水深产生影响,水稻生育期内适宜水深大和蒸发量大的 6 月和 7 月湿地水深对土地利用变化敏感大,8 月水稻开始成熟,用水逐渐减小,水田对湿地水深敏感性逐渐地减小。由表 5 和表 6 对比发现,土地利用方式变化对湿地水深的影响弱于对流域径流量的影响。为了进一步描述土地利用方式变化对湿地水位空间分布的影响,绘制情景 2 和情景 3 土地利用情况下 6 月 1 日的水位分布。由图 13 和图 14 可知,情景 3 湿地水位低于情景 2 湿地水

位,情景 2 湿地上下游水位分别为 57.5、52.5 m,而情景 3 湿地上下游水位分别为 56、52 m。为了反映湿地水位空间分布变化情况,绘制了 6 月 1 日情景 2 湿地水位减去情景 3 湿地水位的差值分布,如图 15 所示。由图 15 可知,整个湿地区域水位下降,最大下降量超过 0.8 m,发生在湿地上游。对比图 2 和图 3 可知,挠力河流域下游南部区域水田面积增加明显,导致南部湿地水位变化大于其他部区域。

4.5 土地利用方式变化对补给地下水量影响

由表 1 可知,水稻田主要生育期需要适宜水深,因此水稻田区域补给地下水量会增加。由表 3 可知,随着水田面积由情景 1 的 0 hm²增加到情景 3 的 53.7 万 hm²,补给地下水量由 26.9 mm 增加到

表 6 湿地平均水深对土地利用方式变化敏感性分析

	时间段									%
	5 月上	5 月下	6 月上	6 月下	7 月上	7 月下	8 月上	8 月下	9 月上	
情景 2	-0.53	-1.62	-2.25	-2.53	-1.16	-1.16	-0.61	0	0	
情景 3	-3.14	-6.13	-9.89	-11.37	-7.65	-5.58	-2.14	-0.01	0	

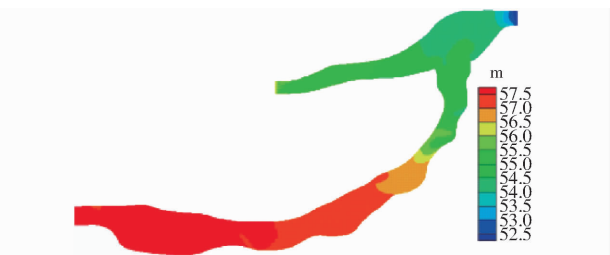


图 13 情景 2 湿地水位分布
Fig. 13 Wetland water level distribution under condition 2

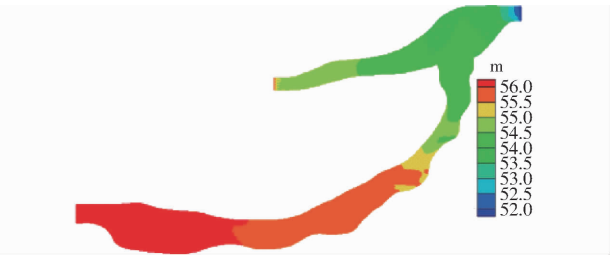


图 14 情景 3 湿地水位分布
Fig. 14 Wetland water level distribution under condition 3



图 15 湿地水位差值分布
Fig. 15 Distribution of wetland water level difference

表 7 补给地下水量对土地利用方式变化敏感性分析

	时间段								%
	5 月上	5 月下	6 月上	6 月下	7 月上	7 月下	8 月上	8 月下	
情景 2	1.85	2.64	0.92	1.06	0.92	0.09	-0.06	0	
情景 3	12.10	17.22	5.90	6.80	5.87	0.59	-0.40	0	

表 8 情景 2 和情景 3 的灌溉水田提水量

	时间段									mm
	5 月上	5 月下	6 月上	6 月下	7 月上	7 月下	8 月上	8 月下	9 月上	
情景 2	0.38	0.50	0.33	0.42	0.34	0.53	0.43	0.24	0	
情景 3	2.57	3.40	2.19	2.88	2.36	3.26	1.96	1.84	0	

水量空间分布图,如图 16、17 所示。从图 16、17 和图 2、3 可以看出,水田覆盖比例大的区域提水量增加非常迅速,情景 3 局部提水量达 21.5 mm,而

39.2 mm。一个地区的土地利用类型由旱田和未利用地转化为水田,其对地下水的补给势必增加,由表 7 情景 2 和情景 3 相对于情景 1 的敏感性数据也验证这一事实。但由表 7 发现,不同时段敏感性不同,5 月敏感性增强,之后敏感性逐渐减弱直至为零。这是因为挠力河流域经过长时间少雨时期,流域地下水水位比较低,而进入 5 月汛期降雨量比较多,补给地下水增加,6 月后地下水补给量达到一定程度,渗入地下水速率逐渐降低。表 7 的 8 月上敏感性为负值,即此时水田种植面积越大对地下水补给量影响越小,其原因:①到 8 月时水稻进入黄熟期补给地下水水量接近旱田。②水田抽取地表水导致水田下游一定区域补给地下水水量减小。

4.6 土地利用方式变化对灌溉水田抽取地下水量影响

由表 8 可知,5—8 月期间种植水田后各个时段灌溉水田提水量增加,每一个情景模式不同生育期内灌溉水田提水量不同,这是由于水田在不同生育期蓄水量和蒸发量不同引起的。由表 8 知,情景 3 每半个月提水量不大于 3.4 mm,开采地下水量不是十分大。这是从流域整体角度研究土地利用方式变化对提水量影响,没有考虑水田空间分布对提水量空间分布的影响。为了研究水田空间分布对提水量空间分布的影响,绘制了 5 月上情景 2 和情景 3 提

同期降雨量才 28.3 mm。局部提取水量非常大很有可能引起地面沉陷、地下水漏斗和含水层挤压等地质灾害。

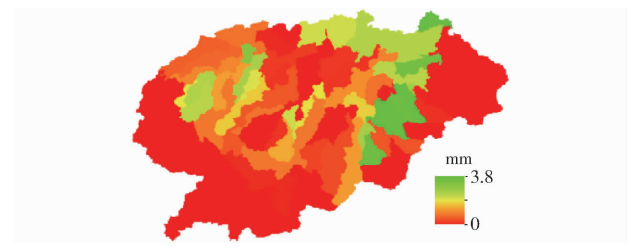


图 16 情景 2 提水量分布

Fig. 16 Withdraw water quantity distribution under condition 2

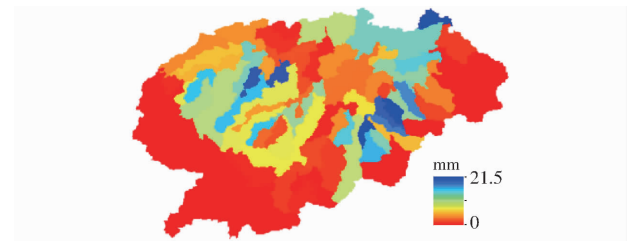


图 17 情景 3 提水量分布

Fig. 17 Withdraw water quantity distribution under condition 3

5 结论

(1)1990—2013 年间挠力河流域草地和林地面积变化不大,旱地面积轻微下降;挠力河流域中部与北

部区域生产条件优越的未利用地和旱地改为水田。
(2)土地利用方式变化对水资源影响按由强到弱顺序为灌溉水田抽取地下水量、绿水储量、径流深、绿水流量、补给地下水量。
(3)水稻不同生育期稻田蒸发量不同导致不同生育期绿水流量和绿水储量的不同,5—6 月呈现绿水流量增加而绿水储量减少趋势,之后这一趋势逐渐减弱,到 8 月后绿水流量和绿水储量向无水田时趋近。
(4)径流深对土地利用变化敏感性变化也是随着水稻生育期不同而不同。水田分布密度大的流域分区径流深降低量比较大,有的区域径流深接近零。
(5)水田生育期和空间分布影响补给地下水量和灌溉水田抽取地下水量的时空分布。水田需水量大的 5—8 月,水田对地下水补给量和灌溉水田抽取地下水量都大,8 月后补给量减小趋于旱田情况,灌溉水田抽取地下水量逐渐减少为零。局部区域水田密集,灌溉水田抽取地下水量非常大,有可能引起地面沉陷、地下水漏斗和含水层挤压等地质灾害。

参 考 文 献

1 DAI A G. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(1): 52 - 58.

2 高继卿,杨晓光,董朝阳,等. 气候变化背景下中国北方干湿区降水资源变化特征分析[J]. 农业工程学报,2015, 31(12):99 - 110.

GAO Jiqing, YANG Xiaoguang, DONG Chaoyang, et al. Precipitation resource changed characteristics in arid and humid regions in Northern China with climate changes[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 99 - 110. (in Chinese)

3 IPCC. Summary for policymakers of climate change 2013;the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 4 - 6.

4 杜国明,潘涛,尹哲睿,等. 水田化进程中的富锦市耕地景观格局演化规律[J]. 应用生态学报,2015,26(1): 207 - 214.

DU Guoming, PAN Tao, YIN Zherui, et al. Cultivated landscape pattern change due to the rice paddy expansion in Northeast China: a case study in Fujin[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1):207 - 214. (in Chinese)

5 SCHILLING K, GASSMAN P, KLING C, et al. The potential for agricultural land use change to reduce flood risk in a large watershed[J]. Hydrological Processes, 2013, 27(17): 1723 - 1734.

6 张耀存,张录军. 东北气候和生态过渡区近 50 年来降水和温度概率分布特征变化[J]. 地理科学, 2005, 25(5): 561 - 566.

ZHANG Yaocun, ZHANG Lujun. Precipitation and temperature probability characteristics in climatic and ecological transition zone of Northeast China in recent 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(5): 561 - 566. (in Chinese)

7 卢洪健,莫兴国,孟德娟,等. 气候变化背景下东北地区气息干旱的时空演变特征[J]. 地理科学, 2015, 35(8): 1051 - 1059.

LU Hongjian, MO Xingguo, MENG Dejuan, et al. Analyzing spatiotemporal patterns of meteorological drought and its responses to climate change across Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(8): 1051 - 1059. (in Chinese)

8 DAGNACHEW L, CHRISTINE V C, FRANCOISE G. Hydrological response of a catchment to climate and land use change in Tropical Africa: case study South Central Ethiopia[J]. Journal of Hydrology, 2003, 275(1 - 2): 67 - 85.

9 CHAFFARI G, KEESSTRA S, GHODOUSI J, et al. SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjanrood Basin, Northwest Iran [J]. Hydrological Processes, 2010, 24(7): 73 - 89.

10 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)

11 李慧,周维博,庄妍,等. 延安市农业水土资源匹配及承载力[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 156 - 162.

LI Hui, ZHOU Weibo, ZHUANG Yan, et al. Agricultural water and soil resources matching patterns and carrying capacity in Yan'an City[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(5): 156 - 162. (in Chinese)

12 南纪琴,王景雷,陶国通,等. 西北旱区农业水土资源匹配格局研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(5): 41 - 45.

NAN Jiqin, WANG Jinglei, TAO Guotong, et al. Matching patterns of agricultural soil and water resources in northwest arid area

- [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(5): 41–45. (in Chinese)
- 13 雷志栋, 苏立宁, 杨诗秀, 等. 青铜峡灌区水土资源平衡分析的探讨[J]. 水利学报, 2002, 33(6): 9–14.
LEI Zhidong, SU Lining, YANG Shixiu, et al. Balance analysis of water resources in Qingtongxia irrigation area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(6): 9–14. (in Chinese)
- 14 王云琦, 齐实, 孙阁, 等. 气候与土地利用变化对流域水资源的影响——以美国北卡罗莱纳州 Trent 流域为例[J]. 水科学进展, 2011, 22(1): 51–58.
WANG Yunqi, QI Shi, SUN Ge, et al. Impacts of climate and land-use change on water resources in a watershed: a case study on the Trent River basin in North Carolina USA[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(1): 51–58. (in Chinese)
- 15 孙才志, 陈丽新, 刘玉玉. 中国农作物绿水占用指数估算及时空差异分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(5): 637–643.
SUN Caizhi, CHEN Lixin, LIU Yuyu. Spatial and temporal variation of crops green water occupancy index in China[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(5): 637–643. (in Chinese)
- 16 杨国胜, 黄介生, 李建, 等. 基于 SWAT 模型的绿水管理生态补偿标准研究[J]. 水利学报, 2016, 47(6): 809–815.
YANG Guosheng, HUANG Jiesheng, LI Jian, et al. Study on ecological compensation standard of green water management based on SWAT model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(6): 809–815. (in Chinese)
- 17 FARAMARZI M, ABBASPOUR K C, SCHULIN R, et al. Modeling blue and green water resources availability in Iran[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(3): 486–501.
- 18 ABBASPOUR K C, ROUHOLAHNEJAD E, VAGHEFI S, et al. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration and uncertainty of a high-resolution large scale SWAT model[J]. Journal of Hydrology, 2015, 524(1): 733–752.
- 19 ZUO D, XU Z, PENG D, et al. Simulating spatiotemporal variability of blue and green water resources availability with uncertainty analysis[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(8): 1942–1955.
- 20 RODRIGUES D, GUPTA H V, MENDIONDO E M. A blue/green water-based accounting framework for assessment of water security[J]. Water Resources Research, 2015, 50(9): 7187–7205.
- 21 BEVEN K J, KIRKBY M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrological Science Bulletin, 1979, 24(1): 43–69.
- 22 BEVEN K, WOOD E F. Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas[J]. Journal of Hydrology, 1983, 65(1): 139–158.
- 23 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)
- 24 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: 106041/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)
- 25 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 the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 142–149. (in Chinese)
- 26 傅丽华, 谢炳庚, 张晔. 长株潭核心区土地利用生态风险多尺度调控决策[J]. 经济地理, 2012, 32(7): 118–122.
FU Lihua, XIE Binggeng, ZHANG Ye. Multi-scale controlling decision of land use ecological risk in Chang-Zhu-Tan core area [J]. Economic Geography, 2012, 32(7): 118–122. (in Chinese)
- 27 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)
- 28 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 Shijiang, SUN Aihua, ZHANG Zhongxue. Experimental research on water consumption law and water using efficiency of paddy under different irrigation mode in Sanjiang plain[J]. Water Saving Irrigation, 2009(11): 12–14. (in Chinese)
- 29 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)
- 30 FALKENMARK M. Coping with water scarcity under rapid population growth[C]//Conference of SADC Nister Pretoria, 1995: 23–24.