

土地结构改变对水土资源平衡的影响分析

官兴龙 付强 关英红 邢贞相 王斌 张盟
(东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 依据 FH69 蓝图模型思想和基于微观理论的格子波尔兹曼法 (LBM) 改进了 TOPMODEL, 进而构建了基于 LBM 的栅格型 (Grid) TOPMODEL (LBMGTOPMODEL)。在利用 LBMGTOPMODEL 描述流域水循环的基础上, 采用 GIS 等技术, 以栅格为单元, 定量计算了挠力河流域 1990 年不考虑水田的土地分布和 2013 年考虑水田的土地分布等两类土地利用背景下的帕默尔干旱指数 (PDSI), 评价了土地结构变化对水土资源平衡的影响。研究结果表明: 从 1990—2013 年期间挠力河流域草地、林地与建筑用地面积变化不大, 耕地面积变化主要是未利用地和旱田转化为水田, 耕地类型主要是旱地; 水稻生育期内的 5—8 月上旬期间, 旱改水田和水田下游坡面处其蒸散发量增加, 补水量减小, 失水量增加, 适宜降雨量增加, 使得挠力河流域蒸散常数增大, 补水常数减小, 径流常数增大, 失水常数增大, 气候特征常数增大; 种植水田处和坡面上水田水流影响处适宜降雨量增加明显, 使挠力河流域由轻微湿润地区变为不干不湿地区; 在水田生育期的 5—7 月间随着时间延续, 两种情况计算的干旱指数差值在变大; 而 8—10 月间种植水田对干旱指数的影响在逐渐降低。该研究结果可为水田开发对区域水土资源平衡的影响和区域干旱评估提供借鉴和参考。

关键词: 水土资源平衡; 土地结构改变; 格子波尔兹曼法; 帕默尔干旱指数; 水文常数

中图分类号: TV133.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)04-0319-11

Influence of Land Structure Change on Balance of Soil and Water Resources

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

Abstract: Few models were constructed to depict the influence of land structure change on water and soil resources balance, most of which were based on the simple water balance equation or conceptual model and hardly reflected the influence of uneven spatial distribution and change of water and soil resources on water and soil resources balance. Based on the conception of FH69 blueprint model and LBM, grid LBMGTOPMODEL was constructed. PDSI index of Naolihe River Basin was calculated quantitatively by means of LBMGTOPMODEL and GIS taking grid as a unit, based on data in 1990 without paddy farmland and data in 2013 with paddy farmland. And then the impact of land structure change on water and soil resources balance was assessed according to the PDSI index. Results showed that there was little change of areas of grassland, woodland and building land during 1990—2013. The change of farmland was mainly due to turn of unused land and drought farmland into paddy farmland, but the draught farmland was still the main type of farmland. During rice growth period from May to early August, the increase of evapotranspiration, decrease of water supply, increase of water loss, and increase of suitable rainfall in downstream slope of paddy farmland resulted in the increase of evapotranspiration constant and decrease of water supply constant, and corresponding increase of runoff constant, water loss constant and climate characteristic constant in Naolihe River basin. The frequency of suitable rainfall in paddy was increased obviously, which converted Naolihe River Basin from slight humid region into appropriate farmland, not too wet or too drought. The difference of draught index under two conditions was enlarged at the growth stage of paddy farmland during May and July, while the influence of paddy farmland on draught was

收稿日期: 2017-08-22 修回日期: 2017-09-19
基金项目: 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, 主要从事水土资源高效利用研究, E-mail: zxzxxing@neau.edu.cn

decreased as the decrease of water demand of paddy farmland. The results can provide reference for the influence of paddy farmland development on regional water and soil resources balance and regional drought assessment.

Key words: water and soil resources balance; land structure change; LBM; PDSI; hydrological constant

0 引言

水土资源是人类生存与发展的基本资料,又是生态环境合理运行的基本组成要素^[1-3]。水土资源是农业土地利用的关键制约因素,其数量的丰富与否和空间分布影响着农业土地利用结构的合理程度^[4]。近年来随着种植结构调整和城市化发展,迫使土地利用方式和覆被发生了变化(LUCC),这影响着水循环过程中的蒸发、土壤含水率和径流量等^[5-6],进而影响着区域水资源的空间分布,势必会影响到水土资源的平衡。由于土地结构不合理和水资源利用量的不合理导致区域农业不可持续问题频繁出现,严重影响农业地区经济繁荣和社会发展。此种背景下,出现了水土资源优化配置和农业结构改变对水土资源平衡影响等研究热点。

一些学者对水土资源合理配置问题、农业结构变化对水循环响应、农业水土资源承载力和水土资源平衡等进行了大量有价值的研究工作,如评价农业结构变化对水循环影响相关方面,史晓亮等^[7]和欧春平等^[8]研究了土地利用/覆被变化对水文响应的影响,PIELKE等^[9]分析了土地覆被变化对大气循环和降雨等的影响;在评价农业水土资源承载力方面,任守德等^[10]提出应从微观和宏观两个层面构建指标体系,而NIKOLAOS等^[11]提出采用评价指标体系概念模型建立区域农业水土资源承载力宏观指标体系;在水土资源配置研究方面,李慧等^[12]从水土资源空间分布格局分析农业水土资源的匹配程度,南纪琴等^[13]在分析水土资源匹配内涵及影响因素的基础上提出了水土资源匹配指数及其计算方法,杨艳昭等^[2]使用单位耕地面积水资源量法计算农业水土资源匹配度及当量系数,CARISIENS等^[14]探索利用社会、经济和农业规划等拓扑关系进行土地资源配置的方法;在评价水土资源供需平衡方面,雷志栋等^[15]依据青铜峡灌区四水转化分析了灌区水土资源供需平衡,CAO等^[16]评估土地使用和土地覆盖变化对地区气候和水土资源的影响。在一些研究中将水和土两种资源隔离开来研究,难于获得一个地区符合实际情况的水土资源量。为了避免这种情况学者们达成一个共识,认为水资源与土资源二者相互联系、相互影响、相互制约和相互依赖,必须把水、土资源作为一个整体来研究,才能更充分发挥水

土资源整体效能^[8-9]。但由于水土资源系统运行的复杂性、涉及区域资源时空分布的不均匀性和研究对象的特殊性,目前研究存在以下3个问题:对于计算和评价区域水土资源总体平衡的研究多,包括区域承载力、区域供需平衡、区域优化配置等方面,而对水土资源空间分布和土地结构变化对水土资源平衡影响研究较少;由定性研究发展为用简单水量平衡方程和集总式概念性模型来进行定量研究,难于反映水资源和土地资源的空间分布不均匀和变化对水土资源的影响;所得结论用区域资源总量表示的多,用于描述水土资源时空分布的图件少。

基于此,选用建三江地区土地结构变化显著的挠力河流域^[10]作为研究区域,采用基于LBM法构建的LBMGTOPMODEL模型^[17-18]描述水土资源,联合水文模型和帕默尔干旱指数模型^[19-22]来评价区域水土资源平衡程度,即利用LBMGTOPMODEL模型计算区域水循环过程中蒸散发量、径流量、水分交换量和土层含水率等,进而求出PDSI来评价水土资源的平衡状态。依据1990年和2013年挠力河流域土地类型变化,分析出挠力河土地变化情况。设定挠力河流域1990年不考虑水田的土地分布和2103年考虑水田分布的土地分布等两种情况来反映水田进程下挠力河流域土地结构变化。求得两种土地分布情况对应的挠力河流域水循环量和PDSI,据此评价农业结构改变对水土资源平衡状态的影响。

1 水土资源平衡评价模型建立

1.1 LBMGTOPMODEL

根据FH69蓝图模型^[23]所提出的水循环框架图(图1)来描述流域水循环。在模块和模型构建过程中,依据水循环的时空过程,将图1降雨径流循环的每一个子过程分别构建模块。将水文过程分解

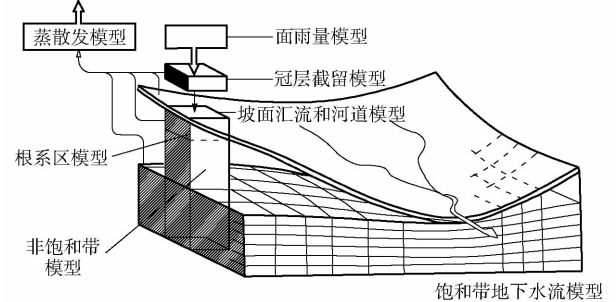


图1 水循环模型架构图

Fig. 1 Diagram of water cycle model

为:采用距离倒数法的面雨量模块、根系区的蒸散发模块、基于 LBM 求解的 Richards 方程而构建的非饱和和带水分运动模块,利用 LBM 求解坡面和河道运动方程而构建的坡面汇流模块,利用 LBM 五速模型求解线性扩散波方程而构建的河流/渠道模块,运用达西定律建立饱和区土壤水运动数值模块。在栅格(Grid)上对模块进行松散耦合,构建基于 LBM 的分布式 TOPMODEL,即 LBMGTOPMODEL^[17-18]。

1.1.1 坡面汇流数值模型

坡面水流运动波方程为

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

式中 h ——水深 g ——重力加速度
 $u、v$ ——水平、垂直方向流速

利用九点速度模型求得式(1)的平衡态分布函数 f 为

$$f_{\alpha} = \begin{cases} \frac{4}{9}h\left[\left(\frac{9}{4}-\frac{15}{8}gh\right)-\frac{3}{2}v^2\right] & (\alpha=0) \\ \frac{h}{9}\left[\frac{3}{2}gh+3e_{\alpha}v+\frac{9}{2}(e_{\alpha}v)^2-\frac{3}{2}v^2\right] & (\alpha=1,2,3,4) \\ \frac{h}{36}\left[\frac{3}{2}gh+3e_{\alpha}v+\frac{9}{2}(e_{\alpha}v)^2-\frac{3}{2}v^2\right] & (\alpha=5,6,7,8) \end{cases} \quad (2)$$

式中 e_{α} —— α 方向的粒子运动速度

1.1.2 河道汇流数学模型

河道水流线性扩散波方程为

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c_3 \frac{\partial Q}{\partial x} = D_3 \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (3)$$

式中 c_3 ——波速 D_3 ——扩散系数
 Q ——河道流量

选用五速模型可推得式(3)的平衡态分布函数为

$$\begin{cases} f_2 = \frac{1}{24}(2B_4 - C_4 - 2D_4 + E_4) \\ f_1 = \frac{1}{6}(-4B_4 + 4C_4 + D_4 - E_4) \\ f_0 = A_4 - \frac{5}{4}C_4 + \frac{1}{4}E_4 \\ f_3 = \frac{1}{6}(4B_4 + 4C_4 - D_4 - E_4) \\ f_4 = \frac{1}{24}(-2B_4 - C_4 + 2D_4 + E_4) \end{cases} \quad (4)$$

式中 $A_4、B_4、C_4、D_4、E_4$ ——中间变量

1.1.3 土壤水运移数学模型

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

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

式中 $A_2、B_2、C_2$ ——中间变量

1.2 水土资源平衡评价模型建立

根据评价水土资源平衡的需要,从区域水文循环过程的视角,利用 LBMGTOPMODEL 计算出研究流域水循环过程的降雨量、蒸发量、水面蒸发量、根系区缺水量、非饱和带缺水量、土壤含水率、地面径流和地下径流等水文量,进而计算出 PDSI 水文常数,之后依据干旱指数理论计算出干旱指数,即 LBMGTOPMODEL-PDSI 水土资源平衡评估模型。

1.2.1 水文常数计算

在利用 LBMGTOPMODEL 算出网格的水循环过程变量的基础上,网格第 t 天的可能径流量 R'_t 、实际补水量 R_t 、可能补水量 R''_t 、实际失水量 L_t 和可能失水量 L'_t 为

$$\begin{cases} R_t = \max((P_t - E_t), (\theta_t - \theta_{t-1})) \\ R''_t = \min(P_2, (\theta' - \theta_t)) \\ R'_t = \max(0, \theta_t) \\ L_t = \max((\theta_t - \theta_{t-1}), \max(0, E_t - P_t)) \\ L'_t = \min(E_2, \max(0, E_t - P_t)) \end{cases} \quad (7)$$

式中 $P_2、E_2$ ——研究流域多年日最大的降雨量和蒸发量

θ' ——田间持水率
 $P_t、E_t$ —— t 时刻降雨量和蒸发量
 θ_t —— t 时刻含水率

网格多年月平均的蒸散常数 α 、补水常数 β 、径流常数 γ 、失水常数 δ 和气候特征常数 K^* 为

$$\begin{cases} \alpha = \bar{E}/E' \\ \beta = \bar{R}/R'' \\ \gamma = \bar{Q}/R' \\ \delta = \bar{L}/L' \\ K^* = (E' + \bar{R})/(\bar{P} + \bar{L}) \end{cases} \quad (8)$$

式中 $\bar{E}$ ——网格多年月平均的蒸发量

E' ——可能蒸发量
 $\overline{R}$ ——实际补水量均值
 $\overline{R''}$ ——可能补水量均值
 $\overline{Q}$ ——实际径流量均值
 $\overline{R'}$ ——可能径流量均值
 $\overline{L}$ ——实际失水量均值
 $\overline{L'}$ ——可能失水量均值

1.2.2 气候适宜降水量确定

多年月份的适宜降水量为

$$\hat{P} = \hat{E} + \hat{R''} + \hat{R'} - \hat{L}_t \tag{9}$$

其中

$$\begin{aligned} \hat{E} &= \alpha E & \hat{R''} &= \beta R'' \\ \hat{R'} &= \gamma R' & \hat{L}_t &= \delta L' \end{aligned}$$

式中 $\hat{E}$ ——气候适宜的网格多年月平均蒸发量
 $\hat{R''}$ ——气候适宜的网格多年月平均补水量
 $\hat{R'}$ ——气候适宜的网格多年月平均径流量
 $\hat{L}$ ——气候适宜的网格多年月平均失水量

1.2.3 干旱指数计算

根据计算的网格第 j 月的降雨 P_j 、气候适宜降水量之差(d_j)、干旱指数 x_j 和水分距平值 z_j 之间的函数关系得干旱指数

$$\begin{cases} x_j = 0.867x_{j-1} + z_j/42.792 \\ d_j = P_j - \hat{P}_j \\ z_j = K_j^* d_j \end{cases} \tag{10}$$

式(10)为联合 LBMGTOPMODEL 和 PDSI 建立的水土资源平衡评估方法的数学表达式。

2 实例应用

2.1 研究区域

挠力河流域位于黑龙江省佳木斯市境内,发源于完达山脉北麓,从西南流向东北,从饶河县东安镇左岸注入乌苏里江,全长 596 km,位置如图 2 所示。多年平均降雨量 518 mm,降雨时空分布不均匀,6—9 月降雨量占全年降雨量达 72%,春季降雨少而秋季雨量大。多年平均蒸发量 1 417.9 mm。有挠力河和七星河 2 个国家级湿地自然保护区。黑龙江省粮食主产区有八五一、红卫、五九七和八五三等农场。水资源丰富,土壤肥沃,地下水距离地面比较近,水温较高,因此从 1990 年以后挠力河流域大力发展利

用地下水种稻,水稻田面积扩展迅速,对该地区水土资源产生了明显影响。



图 2 挠力河流域位置图
Fig.2 Location of Naolihe River Basin

2.2 土地概况

挠力河流域 1990 年和 2013 年土地类型数据见图 3。1990 年和 2013 年各类土地面积转化见表 1。依据图 3 和表 1 可得,挠力河流域从 1990 年到 2013 年期间耕地面积由 124 万 hm^2 发展到 149 万 hm^2 ,增加量达 25 万 hm^2 ,垦殖率达 67.5%。由表 1 得,旱地耕地面积从 1990 年 104.33 万 hm^2 降低到 2013 年 94.90 万 hm^2 ,地势比较平坦的部分转化为水田,但旱地还是主要耕地类型。在保护草地、林地与防止过度开发建设用地的政策下,草地、林地与建设用地面积变化不大。未利用地得到了开垦,面积从 1990 年的 18.76 万 hm^2 降至 2013 年的 2.87 万 hm^2 ,主要贡献为水田。因此可得挠力河流域耕地面积变化主要是未利用地和旱田转化为水田,而耕地类型主要是旱地。

2.3 水稻田灌溉方式及蒸发量

水田灌溉控制水深采用适宜水深作为控制阈值,即水田处地表水面和河道引水量达不到适宜水深时,开采地下水进行灌溉直至水田水深达适宜水深。在实地走访建三江地区农户、向当地水稻生产主管农业部门咨询和归纳总结科研成果^[24-26]的基础上,得到研究区水稻生育期适宜水深(表 2)和蒸散发量(表 3)。表 3 中 E_0 表示水面蒸发量, (E_0 , 2.68)表示蒸发按 E_0 和 2.68 mm 中的大值进行。

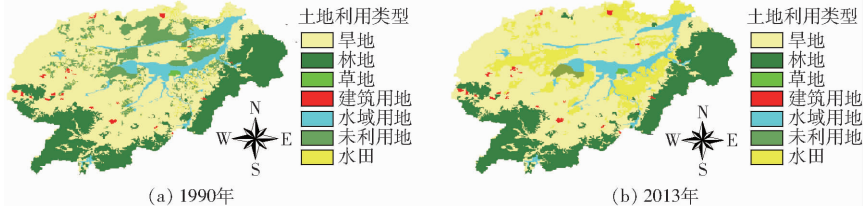


图 3 挠力河流域土地分布
Fig.3 Land distributions in Naolihe River Basin

表 1 挠力河流域土地利用转化									
Tab. 1 Change of land usage in Naolihe River Basin									万 hm ²
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

表 2 水稻生育期适宜水深										
Tab. 2 Suitable depth for rice in growth stage										mm
	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 水稻生育期蒸散发量										
Tab. 3 Evapotranspiration in growth stage of rice										mm
	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—)
E0	E0	(E0, 2. 68)	(E0, 9. 61)	(E0, 9. 61)	E0	(E0, 7. 2)	(E0, 4. 79)	(E0, 1. 85)		2. 35

3 模型参数选取及验证

利用降雨量、蒸发量和流量等水文气象资料率定 LBMGTOPMODEL 模型。降雨量空间分布由宝清、八五三、板房、菜咀子等 30 个雨量站采用距离倒数求得。水面蒸发量取菜咀子和宝清 2 个站的均

值。流量站选取宝清、保安和红旗岭站。经率定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

表 4 LBMGTOPMODEL 模型参数						
Tab. 4 LBMGTOPMODEL model parameters						
流域出口站名	扩散系数/ (m ² ·min ⁻¹)	模型参数	饱和导水率	最大缺水量/ m	扩散系数 D _k / (m ² ·min ⁻¹)	波速 c _k / (m·s ⁻¹)
保安站	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 Flood simulation error statistics from 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/%	实测洪峰流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	计算洪峰流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/ %	确定性 系数
820329	43. 40	26. 20	24. 20	7. 63	47. 10	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

程线的确定性系数为 0.67~0.86,平均值为 0.75,因此 LBMGTOPMODEL 能较好地再现流域径流过程。

4 土地结构变化对水土资源平衡影响

4.1 对水文常数影响分析

由挠力河流域 1974—1990 年期间的降雨、径流和蒸发等水文气象数据,利用 LBMGTOPMODEL 模拟出每年 5—10 月间水循环过程的过程量,从而算出 1990 年不考虑考虑水田情况土地分布和 2013 年考虑水田情况土地分布情况下的月水文常数、气候适宜降雨量和干旱指数空间分布,以探索土地结构变化对水土资源平衡的影响。将 1990 年无水田情况的土地分布和 2013 年有水田土地分布分别简写为 1990 年无水田和 2013 年有水田。

4.1.1 对蒸散常数的影响

依据 1990 年无水田和 2013 年有水田两种土

地分布情况计算的水文常数见表 6。从表 6 可得,水稻种植期的 5—8 月上旬对蒸散常数影响非常明显,8 月份中旬后影响减小。从表 2 和表 3 可知,5—8 月上旬水稻生产旺盛,需水量大,蒸发量大于水面蒸发量,因此 5—7 月水田种植对蒸散常数影响显著。8 月中旬后随着水稻进入乳熟期后适宜水深为零,水田蒸散发量减小,对流域蒸散常数的影响变小,蒸散常数向无水田情况渐渐接近,进入 9 月后趋于相等,这与表 6 中 α 的走势相符。影响明显的是 5 月,由无水田的 0.336 增加到 2013 有水田的 0.752,增大幅度为 41.6%。由 5 月蒸散常数对比(图 4a 和图 4b)知蒸散常数在水田处增加明显。从图 4b 可得,水田处蒸散常数均大于 1,究其原因因为水田的蒸发大于水面蒸发,如表 3 所示。图 4a 减图 4b 得其差值量见图 4c,由图 4c 可知,除水田种植处蒸散常数增大外,水田

表 6 1990 和 2013 年两种土地分布情况计算的 PDSI 水文常数对比

Tab.6 Comparison of hydrological constant PDSI under land distribution in 1990 and 2013

月份	1990 年无水田					2013 年有水田				
	α	β	γ	δ	K^*	α	β	γ	δ	K^*
5	0.336	0.535	0.002 1	0.002 7	0.870	0.752	0.459	0.893 2	0.169 2	0.902
6	0.516	0.578	0.005 3	0.007 9	0.887	0.601	0.563	0.170 7	0.172 1	0.990
7	0.667	0.475	0.002 2	0.006 0	1.190	0.804	0.401	0.531 2	0.172 0	1.314
8	0.622	0.692	0.007 4	0.009 5	0.972	0.700	0.620	0.360 6	0.121 4	1.027
9	0.626	0.667	0.006 2	0.008 0	0.596	0.629	0.665	0.006 6	0.008 4	0.599
10	0.475	0.743	0.002 1	0.003 8	0.979	0.475	0.743	0.002 2	0.003 8	0.980

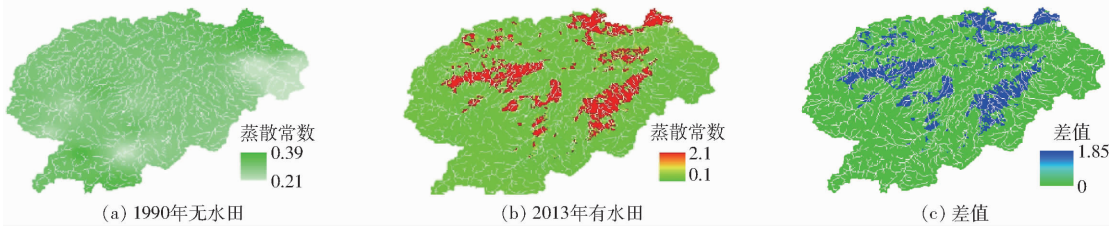


图 4 1990 和 2013 年两种土地分布情况计算的 5 月蒸散常数空间分布对比

Fig.4 Comparisons of spatial distribution of evapotranspiration constant in May based on land distribution in 1990 and 2013

下游的坡面上的非水田处蒸散常数也增大,但增幅没有水田处明显。

4.1.2 对补水常数的影响

由表 6 可得,补水常数也受水田种植的影响,但影响没有蒸散发常数明显。水田生育期 5—8 月上旬对补水常数影响非常明显,8 月中旬后影响减小,进入 9 月后影响减弱,补水常数接近无水田情况。由表 2 和表 3 可得,5—8 月上旬水稻蒸发强烈,导致补水量减小,致使补水常数减小;影响明显的是 7 月,由 1990 年无水田的 0.475 减小到 2013 年有水田的 0.401,减小幅度为 15.6%。为了进一步说明

补水常数产生变化的具体位置,绘制了 1990 年无水田和 2013 年有水田情况下,5 月两种补水常数空间对比图,见图 5。从图 5a 和图 5b 可以得出,种植水田处补水常数明显减小。图 5c 为图 5b 减去图 5a 得到的差值量空间分布。从图 5c 可知,种植水田处的补水常数比种植水田前减小了,减小最大量为 0.42。同时发现水田对水田下游的旱地产生了影响,致使其补水常数增大即补水量增加,这与实际情况相符。

4.1.3 对径流常数的影响

由表 6 的 5—10 月的 2013 年 γ 除以 1990 年 γ

得两种情况下各月的径流常数比值为 425、32、241、48、1.06 和 1.05,可得水田生育期 5—8 月水田对径流常数的影响非常明显,进入 8 月中旬后对径流常数的影响逐渐减小,直至 10 月影响非常小,径流常数接近无水田情况。由表 2 可知,种植水田时需要保持一定适宜水深,因此降雨直接成了径流,这使径流常数增大,再加上抽取地下水使得径流常数大

于 1。图 6 为种植水田对径流常数的影响,图 6a 为 1990 年 5 月不考虑水田分布时计算的径流常数空间分布,图 6b 为 2013 年土地结构时计算的径流常数空间分布,图 6c 为图 6b 减去图 6a 的差值。从图 6a~6c 可知,种植水田处径流常数增大,最大增量为 3.95,在水田下游非水田处径流常数也增大,但增量不明显。

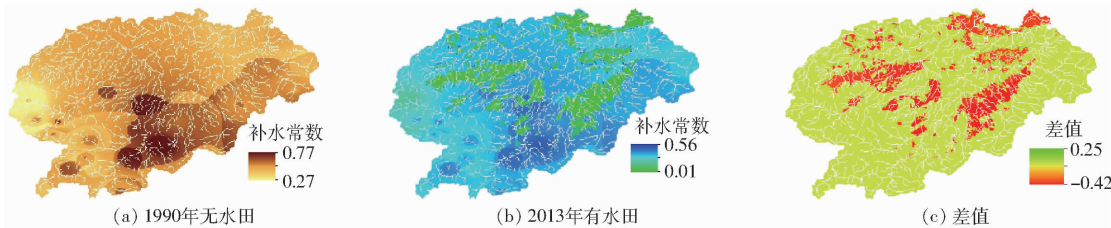


图 5 1990 和 2013 年两种土地分布情况计算的 5 月补水常数空间分布对比

Fig. 5 Comparisons of spatial distribution of water supply constant in May based on land distribution in 1990 and 2013

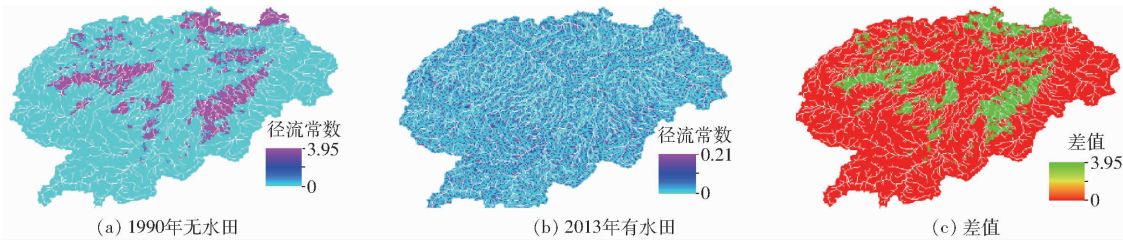


图 6 1990 和 2013 两种土地分布情况计算的 5 月经流常数空间分布对比

Fig. 6 Comparisons of spatial distribution of runoff constant in May based on land distribution in 1990 and 2013

4.1.4 对失水常数的影响

由表 6 可知,种植水田后失水常数增大,由式(7)可知实际失水量为蒸发量减去降雨量,而种植水田后由表 2 可知蒸发量增大,因此失水常数增大。1990 年无水田与 2013 年有水田两种状态下的失水常数空间分布如图 7a 和图 7b 所示。为了反映

失水常数发生位置及其变化情况,绘制了 2013 年有水田状态下的失水常数减去 1990 年无水田状态下失水常数的差值空间分布图(图 7c)。由图 7 知,失水常数增加主要发生在水田处,增量最大值为 0.82,在水田下游旱地处失水常数有一定增大,但是增量不明显。

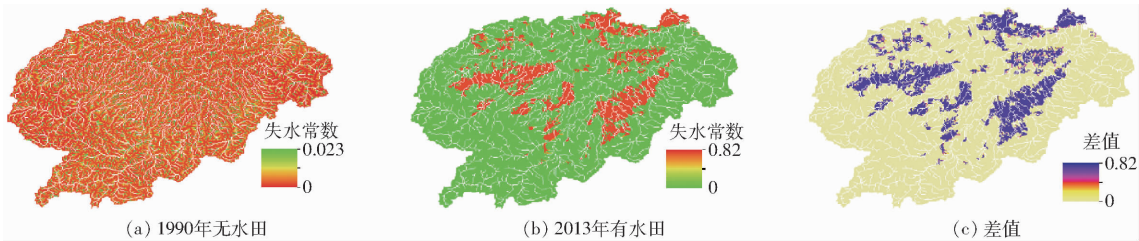


图 7 1990 和 2013 年两种土地分布情况计算的 5 月失水常数空间分布对比

Fig. 7 Comparisons of spatial distribution of water loss constant in May based on land distribution in 1990 and 2013

4.1.5 对气候特征常数的影响

由表 6 可知,种植水田后气候特征常数增大,因为种植水田后每个月的实际蒸发量、产流量和失水量增大,而降雨量不变,由式(8)可得气候特征常数必然增大。5 月气候特征常数分布如图 8 所示。由图 8 可得,气候特征常数增大主要发生在水田处。在水田至河道的坡面处气候特征常数有一定增大,但是增量不明显。

4.2 对气候适宜降雨量的影响

1990 年无水田情况下计算的 5—10 月挠力河流域的适宜降雨量分别为 67.3、60.5、70.1、65.5、53.5、41.7 mm。而 2013 年土地情况下计算的适宜降雨量分别为 76.1、89.0、92.8、72.8、53.9、42.4 mm。可以发现种植水田后适宜降雨量增加明显,在 9 月和 10 月水田进入收获季节需水量减小,致使适宜降雨量相对于 1990 年增加量在减小,适宜

降雨量趋向于无水田情况。6 月的适宜降雨量如图 9 所示。从图 9 可以发现,种植水田处适宜降雨

增加非常明显,这证实了水田对气候适宜降雨量有显著的影响。

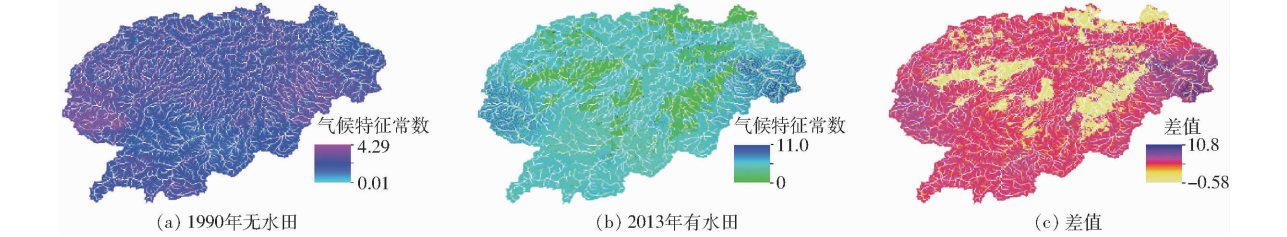


图 8 1990 和 2013 两种土地分布情况计算的 5 月气候特征常数空间分布对比
Fig. 8 Comparisons of spatial distribution of climate characteristic constant in May based on land distribution in 1990 and 2013

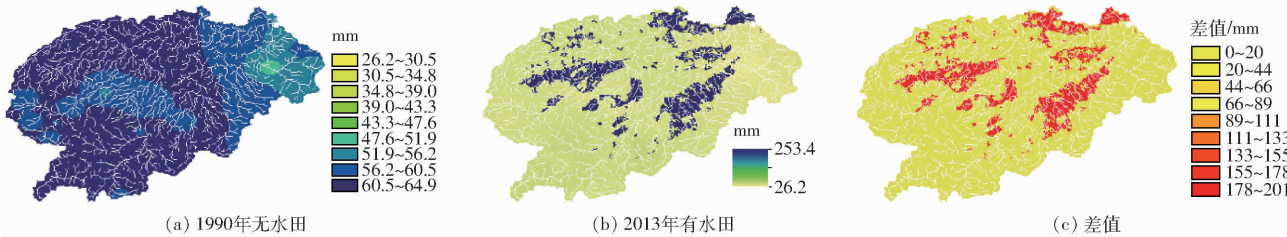


图 9 1990 和 2013 两种土地分布情况计算的 6 月气候适宜降雨量空间分布对比
Fig. 9 Comparisons of spatial distribution of rainfall with suitable quantity in June based on land distribution in 1990 and 2013

4.3 对水土资源平衡的影响

联合 LBMGTOPMODEL 和 PDSI 获得挠力河流域 1974—1990 年多年月平均干旱指数如图 10 所示。根据 1990 年无水田农田布局计算的 5—7 月干旱指数见图 11。根据 2013 年的农田布局情况计算的 5—7 月干旱指数见图 12。由图 10 可知种植水田后挠力河流域的干旱指数减小非常明显。依据 PDSI 干旱等级划分,种植水田后使挠力河流域由轻微湿润地区变为不干不湿地区。从图 10 可以得出,在种植水田的 5—7 月期间两种情况计算的干旱指数差值随时间累积在变大;而 8—10 月期间种植水田对干旱指数的影响在逐渐降低。这是由于 5—7 月是水田用水量增大的时期,而到了 8 月中旬后由表 2 和表 3 知水稻需水量逐渐减小直至适宜水深为零,蒸发量也在逐渐减小。

依据图 11、12 和 5—7 月干旱指数对比分析表明,1990 和 2013 年 2 个时期,不同土地利用方式下挠力河流域的水土资源平衡除了水田和坡面上水田下游处其余部分干旱指数空间分布规律基本一致。从图 11 可知,挠力河流域在没有种植水田时期即

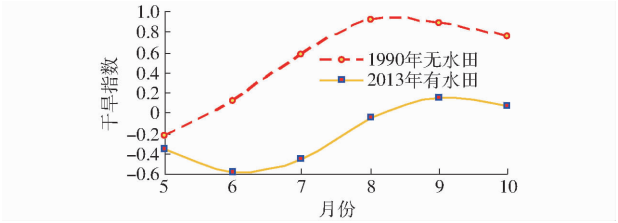


图 10 月干旱指数对比
Fig. 10 Comparison of drought index in corresponding month under two conditions

1990 年时期,处于轻微湿润地区,尤其是该流域的南部山区(按图方位)降雨量比较丰富,干旱指数介于 0.1~0.69,平均值 0.34。从图 11 和图 12 对比分析发现,种植水田处干旱指数明显变大,并且干旱对其后续月份影响越来越显著。干旱指数变化从 5 月的 -2.34 变化到 7 月的 -20.31,变化比较明显,反映出水田种植对区域的干旱影响非常显著,即对区域水土资源的平衡产生了显著影响。

5 讨论

水资源的不足或过量使用易导致土地资源利

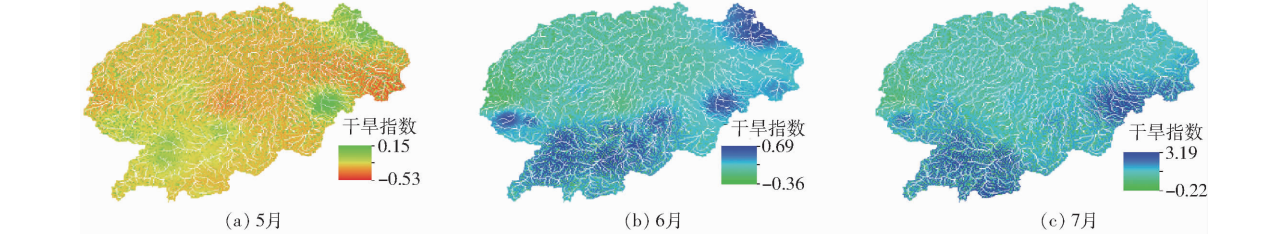


图 11 1990 年不考虑水田的土地分布情况计算的 5—7 月份干旱指数
Fig. 11 Drought index during May and July based on farmland distribution in 1990

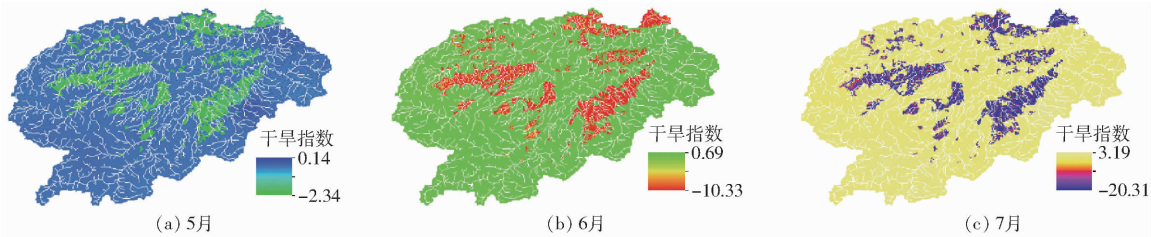


图 12 2013 年土地分布布局情况计算的 5—7 月干旱指数
Fig. 12 Drought index during May and July based on farmland distribution in 2013

用形式发生改变,二者之间内在联系多、耦合关系复杂^[15],在研究水土资源中常常出现相关研究数据获取途径不足、数据空间尺度过大、时间跨度及尺度难以合理确定等问题。通过收集挠力河流域内的水文气象资料和实地调研水田灌溉情况,以当地水田急剧变化时期和农业结构早改水调整期作为时间切入点,联合 LBMGTOPMODEL 和 PDSI 来分析水土平衡态势,即土地结构变化下的水土资源平衡效应。

水田需水量实际受水源开采难易程度、水温、气温、作物种植结构和面积、农民灌水习惯等诸多因素的综合影响^[27],因此难以量化确定,本文利用科研成果统计和实地调研途径综合得出水田适宜水深和蒸散发量,这与实际灌水深度和实际蒸散发量可能存在一定程度的偏差。

针对区域水土资源平衡分析,学者们采用比较多的途径是依据水分盈亏程度来评价平衡程度,此法利用农田垂向水分平衡原理求得水分盈亏程度,而忽略了水平向的地表径流、壤中流和地下径流对水分盈亏量的影响^[28],侧重于从外部水资源多寡程度来衡量农田水土资源平衡程度,对水土资源平衡程度的空间分布情况反映不足。本文利用 LBMGTOPMODEL 计算出栅格内水文量的基础上构建 PDSI 模型,结果侧重于描述农田潜在的水土资源平衡程度和水土资源空间分布情况,可为从事相关研究的学者们提供借鉴和参考。

水稻生育期内除了乳熟期和晒田期外其他时期内水田的蒸散发量大于早改水前旱田的蒸散发量,由式(8)可得蒸散常数增加。多年平均降雨量一定情况下水田处的水稻和水面这个综合体的蒸散发量大于早改水处的蒸散发量,必然出现补水量减小,失水量增加,由式(8)推得补水常数减小、失水常数增大和气候特征常数增大。水田下游处的旱地受到水田影响,其 PDSI 常数与水田常数变化规律接近,只是变化幅度变小。晒田期内水深为零,其蒸发量按

旱田计算。因此可得常数变化和适宜降雨量增加受水田影响的原因为,水稻生育期内的 5—8 月上旬期间,早改水田和水田下游坡面处蒸散发量增加,补水量减小,失水量增加,适宜降雨量增加,使得挠力河流域由轻微湿润地区变为不干不湿地区,8 月中旬后影响减小逐渐恢复到轻微湿润地区。

6 结论

(1)在保护草地、林地与防治过度开发建设用地的政策下,挠力河流域草地、林地与建筑用地面积变化不大,主要耕地类型是旱地。未利用地面积从 1990 年 18.76 万 hm^2 降至 2013 年 2.87 万 hm^2 ,耕地面积变化主要是未利用地和旱田转化为水田。

(2)利用 1974—1990 年的降雨径流资料对 LBMGTOPMODEL 进行了检验,检验结果表明 LBMGTOPMODEL 可以较好地模拟挠力河流域的水循环过程。

(3)依据 FH69 蓝图模型从水循环视角联合 LBMGTOPMODEL 和 PDSI 构建的干旱评估模型,在获得水循环过程的降雨量、根系区蒸散发量、根系区含水率、非饱和带含水率、地面径流量和地下水量等量基础上得到干旱指数。

(4)统计出 1974—1990 年间挠力河流域的多年间月平均降雨量,模拟了 1990 年不考虑水田分布和 2013 年考虑水田分布等农田分布下的干旱常数。水稻生育期内的 5—8 月上旬期间,种植水田处和坡面上水田下游处的蒸发量增大和一定的适宜水深导致流域蒸散常数增大,补水常数减小,径流常数增大,失水常数增大,气候特征常数增大。

(5)种植水田使挠力河流域蒸散发量增加,补水量减少,损失量增加,适宜降雨量增加明显,导致挠力河流域由轻微湿润地区变为不干不湿地区。水田和坡面上水田下游处挠力河流域的水土资源平衡遭到了破坏,其余部分水土资源平衡空间分布规律基本一致。

参 考 文 献

1 董雯,杨宇,张豫芳.绿洲城镇发展与水土资源开发的耦合效应及其时空分异[J].资源科学,2013,35(7):1355-1362.

- DONG Wen, YANG Yu, ZHANG Yufang. Coupling effect and spatio-temporal differentiation between Oasis City development and water-land resources[J]. Resources Science, 2013, 35(7): 1355–1362. (in Chinese)
- 2 杨艳昭, 张伟科, 封志明, 等. 土地利用变化的水土资源平衡效应研究——以西辽河流域为例[J]. 自然资源学报, 2013, 28(3): 437–449.
- YANG Yanzhao, ZHANG Weike, FENG Zhiming, et al. Land use change induced land and water resources balance—a case study on the Xiliaohé Watershed[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(3): 437–449. (in Chinese)
- 3 林耀明, 任鸿遵, 于静洁, 等. 华北平原的水土资源平衡研究[J]. 自然资源学报, 2000, 15(3): 252–258.
- LIN Yaoming, REN Hongzun, YU Jingjie, et al. Balance between land use and water resources in the North China Plain[J]. Journal of Natural Resources, 2000, 15(3): 252–258. (in Chinese)
- 4 姚华荣, 吴绍洪, 曹明明, 等. 区域水土资源的空间优化配置[J]. 资源科学, 2004, 26(1): 99–106.
- YAO Huarong, WU Shaohong, CAO Mingming, et al. Spatial optimum allocation of regional water-land resources[J]. Resources Science, 2004, 26(1): 99–106. (in Chinese)
- 5 FOLEY J A, DEFRIES R, ASNER G P, et al. Global consequences of land use[J]. Science, 2005, 309(5734): 570–574.
- 6 DEFRIES R, ESHLEMAN K N. Land-use change and hydrologic process: a major focus for the future[J]. Hydrological Process, 2004, 18(11): 2183–2186.
- 7 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)
- 8 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[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)
- 9 PIELKE R A, NIYOGI D. The role of landscape processes within the climate system landform-structure evolution, process control[M]. Berlin: Springer, 2010: 67–85.
- 10 任守德, 付强, 王凯. 基于宏观尺度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)
- 11 NIKOLAOS T H, SOULIKIDI S. The environmental state of rivers in the Balkans—a review within the DPSIR framework[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(8): 2501–2516.
- 12 李慧, 周维博, 庄妍. 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. 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)
- 13 南纪琴, 王景雷, 陶国通. 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. 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)
- 14 CARISIENS J G, van der KNAAP W. Strategic landuse allocation: dealing with spatial relationships and fragmentation of agriculture[J]. Landscape and Urban Planning, 2002, 58(2–4): 171–179.
- 15 雷志栋, 苏立宁, 杨诗秀. 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. Balance analysis of water resources in Qingtongxia Irrigation Area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(6): 9–14. (in Chinese)
- 16 CAO Qian, YU Deyong, MATEI G, et al. Impacts of land use and land cover change on regional climate: a case study in the agro-pastoral transitional zone of China[J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(12): 1–13.
- 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: 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)
- 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–Wet land compound area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 142–149. (in Chinese)
- 19 张宝庆, 吴普特, 赵西宁, 等. 基于可变下渗容量模型和 Palmer 干旱指数的区域干旱化评价研究[J]. 水利学报, 2012, 43(8): 926–933.
- ZHANG Baoqing, WU Pute, ZHAO Xining, et al. Study on regional drought assessment based on variable infiltration capacity model and Palmer drought severity index[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(8): 926–933. (in Chinese)

- 20 许继军,杨大文.基于分布式水文模拟的干旱评估预报模型研究[J].水利学报,2010,41(6):739-747.
XU Jijun, YANG Dawen. New model for drought estimation and prediction based on distributed hydrological simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(6): 739-747. (in Chinese)
- 21 徐静,任立良,刘晓帆,等.基于双源蒸散与混合产流的Palmer旱度模式构建及应用[J].水利学报,2012,43(5):545-553.
XU Jing, REN Liliang, LIU Xiaofan, et al. Establishment of Palmer drought severity model based on two-source potential evapotranspiration and hybrid runoff model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(5): 545-553. (in Chinese)
- 22 杨扬,安顺清,刘巍巍,等.帕尔默旱度指数方法在全国实时旱情监视中的应用[J].水科学进展,2007,18(1):52-57.
YANG Yang, AN Shunqing, LIU Weiwei, et al. Application of Palmer drought severity index method to real time drought survey in China[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(1): 52-57. (in Chinese)
- 23 FREEZE R A, HARLAN R L. Blueprint of a physically-based digitally-simulated hydrologic response model[J]. Journal of Hydrology, 1969, 9(3): 237-258.
- 24 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)
- 25 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.
- 26 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.
- 27 赵永刚.石羊河流域农业需水量预测及水资源优化配置研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2011.
ZHAO Yonggang. Agricultural water demand prediction and optimal allocation of water resources in the Shiyang River Basin[D]. Yangling: Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2011. (in Chinese)
- 28 姚晓军,张晓,孙美平,等.1960—2010年中国西北地区水分盈亏量时空特征[J].地理研究,2013,32(4):607-616.
YAO Xiaojun, ZHANG Xiao, SUN Meiping, et al. Spatial-temporal characteristics of water deficit in Northwest China from 1960 to 2010[J]. Geographical Research, 2013, 32(4): 607-616. (in Chinese)
- ~~~~~

(上接第296页)

- 13 THYAGARAJ T, RAO S M. Influence of osmotic suction on the soil water characteristic curves of compacted expansive clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(12): 1695-1702.
- 14 刘继龙,马孝义,张振华.不同土层土壤水分特征曲线的空间变异及其影响因素[J].农业机械学报,2010,41(1):46-52.
LIU Jilong, MA Xiaoyi, ZHANG Zhenhua. Spatial variability of soil water retention curve in different soil layers and its affecting factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 46-52. (in Chinese)
- 15 邓羽松,丁树文,刘辰明,等.鄂东南花岗岩崩岗崩壁土壤水分特征研究[J].水土保持学报,2015,29(4):132-137.
DENG Yusong, DING Shuwen, LIU Chenming, et al. Soil moisture characteristics of collapsing gully wall in granite area of Southeastern Hubei[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(4): 132-137. (in Chinese)
- 16 RAVICHANDRAN N, KRISHNAPILLAI S H. A flexible model for moisture-suction relationship for unsaturated soils and its application[J]. International Journal of Geosciences, 2011, 2(3): 204-213.
- 17 郑健,王燕,蔡焕杰,等.植物混掺土壤水分特征曲线及拟合模型分析[J/OL].农业机械学报,2014,45(5):107-112.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140517&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.017.
ZHENG Jian, WANG Yan, CAI Huanjie, et al. Soil-water characteristic curves of soil with plant additive and analyses of the fitting models[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 107-112. (in Chinese)
- 18 栗现文,周金龙,靳孟贵,等.高矿化度土壤水分特征曲线及拟合模型适宜性[J].农业工程学报,2012,28(13):135-141.
LI Xianwen, ZHOU Jinlong, JIN Menggui, et al. Soil-water characteristic curves of high-TDS and suitability of fitting models[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 135-141. (in Chinese)
- 19 VAN GENUCHTEN M T, LEIJ F J, YATES S R. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils[R]. EPA Report 600/2-91/065, U. S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California, 1991.
- 20 MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 513-522.
- 21 BURDINE N T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data[J]. Journal of Petroleum Technology, 1953, 5(3): 71-78.
- 22 CHAUDHARIS K, SOMAWANSHI R B. Effect of water quality on moisture retention in soil of different texture[J]. Journal of Agricultural Physics, 2007, 7(1): 20-26.
- 23 王宇,吴刚.一种基于物理化学基础分析的土水特征曲线模型[J].岩土工程学报,2008,30(9):1282-1290.
WANG Yu, WU Gang. Understanding and modelling soil-water characteristic curves[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1282-1290. (in Chinese)