

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.031

基于HWSD的GSAC模型网格化产流参数估计与校正

王斌^{1,2} 丁星臣¹ 黄金柏³ 宫兴龙¹ 朱士江⁴ 王贵作⁵

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030;
3. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 扬州 225009; 4. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002;
5. 水利部发展研究中心, 北京 100038)

摘要: 针对基于网格的萨克拉门托模型(GSAC)产流参数难以估计的问题, 提出利用世界和谐土壤数据库(HWSD)土壤属性数据估计和校正该模型产流参数的方法。首先, 采用HWSD土粒百分含量和土壤质地分类数据估算流域各网格顶层(T层)与底层(S层)土壤的凋萎系数、田间持水量、饱和含水量等土壤水分常数; 再采用一个气候指数和HWSD的T层张力水容量、田间持水量及凋萎系数推求GSAC模型上层厚度, 继而利用上层厚度将流域各网格的HWSD土壤水分常数转换为GSAC模型上、下层土壤水分常数; 最后利用GSAC模型上层厚度与转换了的土壤水分常数估计流域各网格的产流参数; 在估计产流参数的同时, 采用12个系数对这些产流参数进行校正, 所有的校正系数通过自由搜索(FS)算法率定GSAC模型确定。呼兰河流域的应用结果表明: 基于HWSD土壤属性数据估计GSAC模型网格化产流参数的方法简便易行, 利用校正产流参数驱动的GSAC模型在率定期与验证期的纳什效率系数(NSEC)分别为0.81和0.83, 与不校正产流参数情况相比, 校正产流参数的GSAC模型能够取得更高的模拟精度。

关键词: GSAC模型; 网格化产流参数; 世界和谐土壤数据库; 参数估计; 校正系数

中图分类号: P333.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)09-0250-07

Grid Runoff Parameters Estimation and Adjustment of GSAC Model Based on HWSD

WANG Bin^{1,2} DING Xingchen¹ HUANG Jinbai³ GONG Xinglong¹ ZHU Shijiang⁴ WANG Guizuo⁵

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China

3. College of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

4. College of Hydraulic and Environmental Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China

5. Development Research Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: The grid-based Sacramento (GSAC) model divides a basin into discrete areas using grids. Conventionally, it is difficult to achieve the grid parameter for runoff module of GSAC model. With an aim to solve this problem, a method for estimating the runoff parameters of GSAC model using the soil property data of harmonized world soil database (HWSD) was proposed, in which the physical and chemical characteristics of each soil layer were given on the basis of the division of topsoil (0 ~ 30 cm) and subsoil (30 ~ 100 cm). Firstly, the percentages of sand and clay content and texture classification in topsoil (T-layer) and subsoil (S-layer) of HWSD were extracted. And the data was used to estimate the soil water constants such as wilting point, field capacity and saturated water content in each grid. Secondly, the upper layer thickness of GSAC model was adjusted using wilting point, field capacity and tension water capacity of T-layer, and a climatic index defined as ratio of mean annual precipitation to potential evapotranspiration. In each grid, the soil water constants of T-layer and S-layer were converted into those in the upper layer and lower layer of GSAC model by upper layer thickness. Finally, runoff parameters in each grid were estimated using the upper layer thickness and the converted soil water

收稿日期: 2017-01-17 修回日期: 2017-02-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400101)、国家自然科学基金项目(51009026、41271046)、中国电力建设股份有限公司科技课题项目(DJ-ZDZX-2016-02)和农业部农业水资源高效利用重点实验室开放课题项目(2015002)

作者简介: 王斌(1976—), 男, 副教授, 博士, 主要从事农业节水和水文过程模拟研究, E-mail: wangbin@neau.edu.cn

constants of GSAC model. Meanwhile, totally 12 adjustment coefficients were used to adjust the runoff parameters, and all the adjustment coefficients were determined by the GSAC model via the free search (FS) algorithm. The results of model application in the Hulan River Basin indicated that it was feasible to estimate runoff parameters of GSAC model using HWSO soil property data; the better runoff simulation results were obtained by GSAC model using the adjusted runoff parameters; and Nash efficiency coefficients (NSE) were 0.81 and 0.83 of the calibration phase and verification phase, respectively.

Key words: grid-based Sacramento model; grid runoff parameters; harmonized world soil database; parameter estimation; adjustment coefficients

引言

萨克拉门托(Sacramento, SAC)模型是美国萨克拉门托河流预报中心研制的一个概念性集总参数模型,结构较简单,通用于湿润与干旱地区^[1-4]。虽然 SAC 模型具有一定的物理机制,但受集总式模型结构和参数限制,不能从机理上反映降水和下垫面空间分布不均对降水径流的影响;由于 SAC 模型不具有描述植被截留、积雪融雪的相应结构,也不能描述植被截留蒸发、积雪融雪等水文过程;此外,尽管 SAC 模型大多数参数具有物理意义,但一般不能直接确定这些参数,通常需要依据参数的概念和实测资料,采用试错或优选等方法确定较合理的参数值^[5-8]。可见, SAC 模型机制较好,适用地域范围较广,但其结构设计和参数估计方面仍需改进。

针对 SAC 模型的应用优势和存在的问题,王斌等^[9]将 SAC 模型在透水面积上的产流概念引入到网格,构建了一个基于网格的 SAC 模型(Grid-based Sacramento model, GSAC 模型),可以较好地描述降水、气象、地形、植被、土壤等因素空间变异对水文过程的影响,目前已在黑龙江省欧根河流域和宝清河流域的日径流过程模拟、土地利用/覆被变化对径流的影响研究中取得了较好的应用效果^[9-11]。然而, GSAC 模型的多种水文过程均以网格为计算单元,如何估计各网格参数是应用该模型面临的一大难题。

王斌等^[9]从联合国粮农组织(FAO)早期发布的全球数字土壤图中提取流域各网格的土壤编号,利用不同编号土壤的砂粒、粘粒百分含量等计算土壤水分常数,继而采用率定土层厚度的方法初步实现了 GSAC 模型产流参数的网格化。然而,这种方法将相同编号土壤的厚度和水分常数视为相同,由于每种土壤都需要率定上层厚度,当流域较大或土壤类型较多时,率定模型的难度也随之加大;此外,所求参数的空间分布情况受土壤数据分辨率制约,尤其早期的 FAO 土壤数据仅有一层,无法细致描述 GSAC 模型上层(upper layer)与下层(lower layer)参数的差异。近年来,FAO、国际应用系统分析研究所

(IIASA)、世界土壤参考信息中心(ISRIC)、中国科学院南京土壤研究所(ISSCAS)、欧洲委员会合作研究中心(JRC)等机构联合发布了世界和谐土壤数据库(HWSO),该数据库按 0~300 mm 的 T 层(topsoil)和 300~1 000 mm 的 S 层(subsoil)给出了多种土壤属性数据,空间分辨率为 30",为估算更高分辨率的网格化土壤水分常数提供了基础数据。本文提出基于 HWSO 土壤属性数据的 GSAC 模型网格化产流参数估计与校正方法,以期为更好地利用和发展 GSAC 模型奠定基础。

1 GSAC 模型产流参数估计与校正方法

SAC 模型具有 11 个主要参数和 5 个次要参数^[12-16],主要参数包括上层张力水容量(UZTWM)、上层自由水容量(UZFWM)、上层自由水出流系数(UZK)、下层张力水容量(LZTWM)、下层附加自由水容量(LZFSM)、下层基本自由水容量(LZFPM)、下层附加自由水出流系数(LZSK)、下层基本自由水出流系数(LZPK)、上层向下层下渗水量中补给下层自由水比例(PFREE)、下渗系数(ZPERC)、下渗曲线指数(REXP);次要参数是指永久不透水面积比例(PCTIM)、可变不透水面积比例(ADIMP)、不闭合的地下水出流量比例(SIDE)、下层自由水中不参与蒸散发的比例(RSERV)以及河网、湖泊及水生植物的覆盖面积比例(SARVA)。

GSAC 模型设计了植被截留、蒸散发、积雪融雪、产流、汇流等模块,其中产流模块借鉴了 SAC 模型在透水面积上的计算思想,因此, GSAC 模型具有与 SAC 模型主要参数概念相同的 11 种产流参数,本文即研究这些产流参数的估计与校正方法。KOREN 等^[12-13]研究表明可以应用土层厚度和土壤水分常数估计这 11 种主要参数,具体公式详见文献[12-13,16]。考虑到土壤数据库与流域实际土壤的差异,提出利用校正系数校正的 GSAC 模型产流参数计算公式为

$$UZTWM = p_{UZTWM} Z_{up} (\theta_{f,up} - \theta_{w,up}) \quad (1)$$

$$UZFWM = p_{UZFWM} Z_{up} (\theta_{s,up} - \theta_{f,up}) \quad (2)$$

$$UZK = p_{UZK} [1 - (\theta_{f,up}/\theta_{s,up})^n] \quad (3)$$

$$LZTWM = p_{LZTWM} (Z_{\max} - Z_{\text{up}}) (\theta_{f,\text{low}} - \theta_{w,\text{low}}) \quad (4)$$

$$PFREE = p_{PFREE} (\theta_{w,\text{low}} / \theta_{s,\text{low}})^n \quad (5)$$

$$LZFSM = p_{LZFSM} (Z_{\max} - Z_{\text{up}}) (\theta_{s,\text{low}} - \theta_{f,\text{low}}) PFREE \quad (6)$$

$$LZFPM = p_{LZFPM} (Z_{\max} - Z_{\text{up}}) (\theta_{s,\text{low}} - \theta_{f,\text{low}}) (1 - PFREE) \quad (7)$$

$$LZSK = p_{LZSK} \left[\frac{UZK}{1 + 2(1 - \theta_{w,\text{low}})} \right] \quad (8)$$

$$LZPK = p_{LZPK} \left[1 - \exp \left(- \frac{\pi^2 K_s D_s^2 (Z_{\max} - Z_{\text{up}}) \Delta t}{\mu} \right) \right] \quad (9)$$

$$ZPERC =$$

$$\frac{LZTWM + LZFSM(1 - LZSK) + LZFPM(1 - LZPK)}{LZFSM \cdot LZSK + LZFPM \cdot LZPK} \quad (10)$$

$$REXP = p_{REXP} \left(\frac{\theta_{w,\text{low}}}{\theta_{w,\text{sand}} - 0.001} \right)^{0.5} \quad (11)$$

式中 Z_{up} ——上层厚度, mm

$\theta_{f,\text{up}}$ ——上层田间持水量, cm^3/cm^3

$\theta_{w,\text{up}}$ ——上层凋萎系数, cm^3/cm^3

$\theta_{s,\text{up}}$ ——上层饱和含水量, cm^3/cm^3

n ——经验指数 D_s ——河网密度

Z_{\max} ——上下层总厚度, mm

$\theta_{f,\text{low}}$ ——下层田间持水量, cm^3/cm^3

$\theta_{w,\text{low}}$ ——下层凋萎系数, cm^3/cm^3

$\theta_{s,\text{low}}$ ——下层饱和含水量, cm^3/cm^3

K_s ——饱和水力传导度, mm/h

Δt ——时间步长, h μ ——土壤给水度

$\theta_{w,\text{sand}}$ ——砂凋萎系数

p_{UZTWM} ——上层张力水容量校正系数

p_{UZFWM} ——上层自由水容量校正系数

p_{UZK} ——上层自由水出流系数校正系数

p_{LZTWM} ——下层张力水容量校正系数

p_{PFREE} ——上层向下层下渗水量中补给下层自由水比例校正系数

p_{LZFWM} ——下层自由水容量校正系数

p_{LZSK} ——下层附加自由水出流系数校正系数

p_{LZPK} ——下层基本自由水出流系数校正系数

p_{REXP} ——下渗曲线指数校正系数

式(1)~(11)中, n 、 Z_{\max} 、 D_s 、 K_s 、 D_s 、 Δt 、 μ 、 $\theta_{w,\text{sand}}$

可参照文献[12-13,16]计算或取值;式(6)、(7)中均含有 $(Z_{\max} - Z_{\text{up}}) (\theta_{s,\text{low}} - \theta_{f,\text{low}})$ 和 $PFREE$, 而 $PFREE$ 已在式(5)中采用 p_{PFREE} 进行了校正, 因此, 式(6)和式(7)采用相同的校正系数 p_{LZFWM} ; 式(10)中, 计算 $ZPERC$ 所利用的其他参数值已在式(4)、式(6)~(9)中分别进行了校正, 因此不再校正

$ZPERC$ 。可见, 当上层厚度与上、下层的田间持水量、凋萎系数和饱和含水量均为已知量时, 应用式(1)~(11)和9个系数即可估计并校正GSAC模型产流参数。

2 利用HWSD土壤属性数据估计和校正GSAC模型产流参数

由式(1)~(11)可以看出, 实现GSAC模型产流参数网格化的前提是能够获取网格化的上层厚度和上、下层土壤水分常数。KOREN等^[13]研究表明可以利用土壤的砂粒、粘粒百分含量及质地分类数据估算土壤水分常数, 王斌等^[17]采用这种方法利用HWSD土壤属性数据在30'分辨率下估算了呼兰河流域各网格T、S层的田间持水量、凋萎系数及饱和含水量。然而, GSAC模型的上、下层与HWSD的T、S层不同, 所得的这3种土壤水分常数还不能直接作为GSAC模型的上、下层土壤水分常数使用。为此, 还需估计和校正GSAC模型各网格的产流参数。

2.1 推求GSAC模型上层厚度

研究表明可以利用气候指数、先验的上层张力水容量($UZTWM_{\text{pri}}$)得到校正的上层张力水容量($UZTWM_{\text{adj}}$), 再利用 $UZTWM_{\text{adj}}$ 和上层的田间持水量与凋萎系数推求上层厚度^[18-19]

$$Z_{\text{up,adj}} = \frac{UZTWM_{\text{adj}}}{\theta_{f,\text{up}} - \theta_{w,\text{up}}} \quad (12)$$

$$\text{其中 } UZTWM_{\text{adj}} = 23.6 e^{0.004UZTWM_{\text{pri}}} (P/PET)^{-1.33} \quad (13)$$

式中 $Z_{\text{up,adj}}$ ——校正的上层厚度, mm

P ——多年平均降水量, mm

PET ——多年平均潜在蒸散量, mm

该方法定义的气候指数为年均降水量与年均潜在蒸散量(利用植被因子校正的水面蒸发量)的比值。然而, 我国水面蒸发量监测站点布设密度不高, 蒸发皿系数和各种土地覆被下的植被系数也不易获取, 较难满足流域尺度的网格插值要求; 此外, 我国缺乏可以直接利用的 $UZTWM_{\text{pri}}$ 、 $\theta_{f,\text{up}}$ 和 $\theta_{w,\text{up}}$ 数据, 式(13)的3个经验系数(23.6、0.004、-1.33)也不宜直接推广到我国各流域。为此, 假定HWSD的T层与GSAC模型上层的土壤物理属性与空间分布规律相近, 利用HWSD的T层张力水容量代替 $UZTWM_{\text{pri}}$, 参照式(12)和式(13), 提出利用HWSD土壤属性数据校正上层厚度

$$Z_{\text{up}} = \frac{c_1 e^{c_2 TTWM} (P_G/PET_G)^{c_3}}{\theta_{f,T} - \theta_{w,T}} \quad (14)$$

$$\text{其中 } TTWM = Z_{\text{top}} (\theta_{f,T} - \theta_{w,T}) \quad (15)$$

式中 $TTWM$ ——T层张力水容量,mm
 P_G ——网格化的多年平均降水量,mm
 PET_G ——网格化的多年平均潜在蒸散量,mm
 c_1, c_2, c_3 ——地区经验系数
 $\theta_{f,T}$ ——T层田间持水量, cm^3/cm^3
 $\theta_{w,T}$ ——T层凋萎系数, cm^3/cm^3
 Z_{top} ——T层土壤厚度,mm

网格降水量采用雨量站实测数据的多年平均值插值获得;网格潜在蒸散量利用 Shuttleworth - Wallace 模型计算(计算过程可参照文献[20]),并将计算结果统计为多年平均值;采用模型率定的方法确定式(14)中的 c_1, c_2, c_3 ,不仅可以解决公式的地区移用问题,同时还能起到校正上层厚度的作用。式(14)、(15)以及下文的 T、S 层田间持水量、凋萎系数、饱和含水量均利用 HWSD 的 T、S 层土壤属性数据估算,具体估算方法参照文献[13,17]。

2.2 转换 GSAC 模型两土层土壤水分常数

在利用 HWSD 土壤属性数据估算出 T、S 层土壤水分常数后,提出

$$\theta_{f,low} = \frac{(Z_{top} - Z_{up})\theta_{f,T} + (Z_{max} - Z_{top})\theta_{f,S}}{Z_{max} - Z_{up}} \quad (16)$$

$$\theta_{w,low} = \frac{(Z_{top} - Z_{up})\theta_{w,T} + (Z_{max} - Z_{top})\theta_{w,S}}{Z_{max} - Z_{up}} \quad (17)$$

$$\theta_{s,low} = \frac{(Z_{top} - Z_{up})\theta_{s,T} + (Z_{max} - Z_{top})\theta_{s,S}}{Z_{max} - Z_{up}} \quad (18)$$

式中 $\theta_{s,T}$ ——T层饱和含水量, cm^3/cm^3
 $\theta_{f,S}$ ——S层田间持水量, cm^3/cm^3
 $\theta_{w,S}$ ——S层凋萎系数, cm^3/cm^3
 $\theta_{s,S}$ ——S层饱和含水量, cm^3/cm^3

将这些参数转换为 GSAC 模型上、下层土壤水分常数。如果模型率定的某网格 $Z_{up} \leq 300$ mm,则该网格的上层在 T 层内,上层土壤水分常数取 T 层土壤值,下层土壤水分常数在 $(Z_{max} - Z_{up})$ 厚度内取加权平均值。如果模型率定的某网格 $Z_{up} > 300$ mm,则该网格的上层包含 T 层,下层土壤水分常数取 S 层土壤值,上层土壤水分常数在 Z_{up} 厚度内取加权平均值,即

$$\theta_{f,up} = \frac{Z_{top}\theta_{f,T} + (Z_{up} - Z_{top})\theta_{f,S}}{Z_{up}} \quad (19)$$

$$\theta_{w,up} = \frac{Z_{top}\theta_{w,T} + (Z_{up} - Z_{top})\theta_{w,S}}{Z_{up}} \quad (20)$$

$$\theta_{s,up} = \frac{Z_{top}\theta_{s,T} + (Z_{up} - Z_{top})\theta_{s,S}}{Z_{up}} \quad (21)$$

P_G, PET_G 和 HWSD 的 T、S 层土壤水分常数均能预先计算并作为 GSAC 模型的输入数据,当率定出 c_1, c_2, c_3 后即可校正各网格的 Z_{up} ,继而利用

式(16)~(21)估算各网格上、下层的土壤水分常数。

2.3 Free search 算法率定 GSAC 模型产流参数校正系数

在 GSAC 模型中,其他模块参数主要包括植被截留系数 C_{int} 、雨雪划分温度阈值 T_{sr} 、度日因子 M_f 、马斯京根法蓄量常数 K_{mus} 、马斯京根法流量比重因子 X_{mus} 等,这些参数一般可依据文献取值(C_{int})或通过试验测定(T_{sr}, M_f),也可采用经验方法或根据河道水力特性推求(K_{mus}, X_{mus})。本文将校正产流参数的 12 个系数作为模型参数,与其他模块参数一起率定。由于率定的参数较多,普通方法难以奏效,需借助优化算法自动完成。Free search(FS)是一种源于动物群体迁移行为的智能优化算法^[21],其迭代过程简单,仅需设置群体数量、探查步数、迭代次数 3 个算法参数,寻优效率较高,在率定模型参数时取得了良好效果^[8,22-23]。因此,引入 FS 算法率定 GSAC 模型,并通过 GSAC 模型对流量的模拟精度评价该产流参数估计与校正方法,GSAC 模型的模拟精度采用纳什效率系数(NSEC)评价。

3 实例应用

为检验利用 HWSD 估计和校正 GSAC 模型产流参数的效果,以实际流域为例设置了 2 种对比方案:当校正产流参数时,设 p_{UZTWM} 等 9 个系数的变化区间为 0.7~1.3,参照式(13)的经验系数设 c_1, c_2, c_3 变化区间分别为 0~70.8、0~0.012、-3.99~0,所有校正系数和其他模块参数均采用 FS 算法率定 GSAC 模型推求,在率定模型的同时完成 12 个校正系数的敏感性分析;当不校正产流参数时,设 p_{UZTWM} 等 9 个校正系数均为 1, c_1, c_2, c_3 取式(13)经验值,其他模块参数采用 FS 算法率定 GSAC 模型确定。

3.1 流域概况

呼兰河是松花江左岸支流,发源于小兴安岭西麓,最大支流为诺敏河和通肯河,其干流在与通肯河交汇后改向南流,至哈尔滨市呼兰区流入松花江。呼兰河水系地处黑龙江省中部,所在地区多年平均气温为 2.1℃,最低气温为 -41.8℃,季节性冻土的深度一般在 2 m 左右,降水量、径流量在年际和年内分配很不均匀,洪峰流量年际变化较大^[24]。本文选择呼兰河兰西站(126°21'E、46°15'N,海拔高度 121 m)以上的 27 736 km²集水区为研究流域,见图 1。

3.2 基础数据

日降水量和日流量数据均来自《中国水文年鉴》,采用泰森多边形法将各雨量站数据插值到流域内各网格;日气象数据包括实际水汽压、实际日

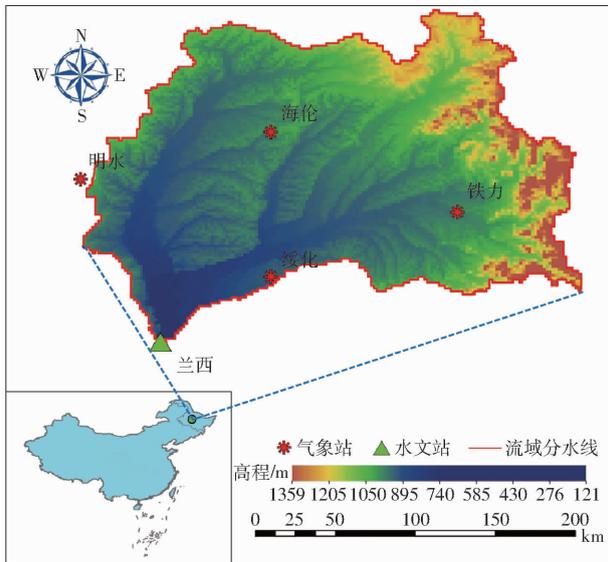


图1 呼兰河流域在中国的位置

Fig.1 Location of Hulan River Basin in China

照时数、最高气温、最低气温、平均气温及风速等,来自呼兰河流域内及周边的铁力、绥化、海门、明水4个气象站,数据下载于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),采用泰森多边形法将气象站数据插值到流域内各网格;DEM采用美国地质调查局(USGS)的30"分辨率数据,依据兰西站地理坐标提取呼兰河流域DEM,作为提取其他数据的掩膜;土地覆被采用国际地圈生物圈计划(IGBP)的30"分辨率数据,经提取后的呼兰河流域共有12种IGBP土地覆被类型;NDVI采用NOAA-AVHRR全球8 km分辨率旬数据,并将其分辨率转化为30";HWSO土壤属性数据来自寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>),提取的呼兰河流域T、S层砂粒、粘粒百分含量和USDA土壤质地分类数据以及利用这些数据估算的T、S层土壤水分常数见文献[17]。

3.3 校正系数敏感性分析与率定结果

以1991—2000年的10 a为研究时段,1991—1995年为率定期,1996—2000年为检验期,设定FS算法群体数量为10、探查步数为4、迭代100次,记录算法迭代过程中所有动物每步探查的位置(GSAC模型参数)及适应值(NSEC)作为分析参数敏感性的样本数据,并取算法的最好寻优结果作为参数取值,结果见表1。

由表1可见,在呼兰河流域,较敏感的是校正上层厚度的3个地区经验系数及上层张力水与自由水容量校正系数,不很敏感的是下层自由水出流系数和下渗曲线指数校正系数,最不敏感的是上层自由水出流系数校正系数。由参数敏感性分析结果可以看出:较敏感的 c_1 、 c_2 、 c_3 表明不同流域间不宜直接移用这3个经验系数; p_{UZFWM} 、 p_{UZTWM} 较敏感则说明上

表1 呼兰河流域GSAC模型产流参数校正系数敏感性与取值
Tab.1 Sensitivity and optimal values of adjustment coefficients for GSAC model runoff parameters over Hulan River Basin

校正系数	T 检验值	P	数值
c_1	31.483 3	<0.000 1	68.636 0
c_3	8.782 2	<0.000 1	-0.574 6
p_{UZFWM}	5.245 0	<0.000 1	1.078 7
p_{UZTWM}	4.961 6	<0.000 1	1.253 6
c_2	3.456 3	0.000 6	0.009 7
p_{LZFWM}	3.360 1	0.000 8	1.201 9
p_{LZTWM}	2.267 5	0.023 5	0.887 9
p_{PFREE}	1.836 4	0.066 4	1.053 9
p_{LZSK}	1.427 1	0.153 7	0.760 5
p_{LZPK}	0.441 0	0.659 3	0.871 6
p_{REXP}	-2.642 1	0.008 3	0.846 1
p_{UZK}	-4.577 1	<0.000 1	1.144 5

层的张力水容量和自由水容量对呼兰河流域产流过程影响较大;较不敏感的 p_{LZSK} 、 p_{LZPK} 、 p_{UZK} 则表明LZSK、LZPK、UZK对地下水和壤中流出流量影响较小; p_{REXP} 较不敏感表明改变REXP值对下渗曲线形状影响不大。

3.4 GSAC模型产流参数校正结果

在FS算法率定GSAC模型后,依据表1中12个校正系数的率定值,得到校正后的呼兰河流域GSAC模型上层厚度及产流参数见图2。

由图2可以看出,利用HWSO土壤属性数据实现了GSAC模型产流参数的网格化,上层厚度与产流参数均具有明显的水系空间分布规律,各种参数的空间分辨率与HWSO一致,均为30",这为在全流域各网格开展产流计算奠定了参数基础。

3.5 网格化产流参数驱动的GSAC模型模拟效果

图3、图4为校正和不校正产流参数情况下,GSAC模型对呼兰河兰西站流量的模拟结果。在1991—2000年间,2种方案下模型的模拟精度见表2。

我国现行的《水文情报预报规范》规定可以采用确定性系数 D_c 指标(与本文的NSEC定义及公式一致)评定洪水预报误差,并划分了甲($D_c > 0.90$)、乙($0.70 \leq D_c \leq 0.90$)、丙($0.50 \leq D_c < 0.70$)3种精度等级^[25]。结合图3、图4和表2可以看出,校正产流参数的GSAC模型模拟值与实测值总体符合情况良好,能较好再现呼兰河流域实测日流量过程。在率定期与验证期的平均NSEC分别为0.81和0.83;除1995年模拟精度稍低外,其他年份均达到了乙精度等级。在不校正产流参数情况下,GSAC模型的模拟效果很差,模拟值总体偏高,在率定期内平均NSEC为-0.18,在验证期内平均NSEC为-2.70;模拟情况最好的1991年NSEC仅为0.47,未达规范

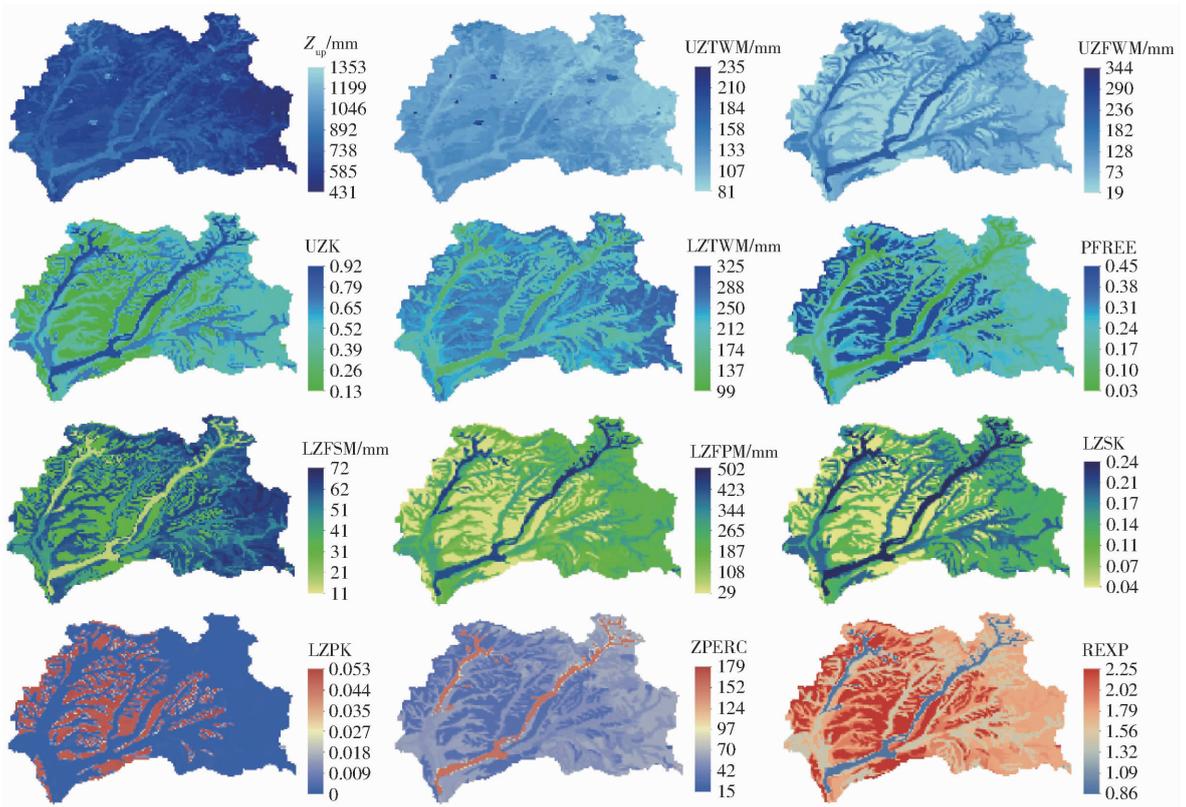


图 2 呼兰河流域 GSAC 模型上层厚度与产流参数空间分布

Fig. 2 Spatial distribution maps of upper layer thickness and runoff parameters over Hulan River Basin

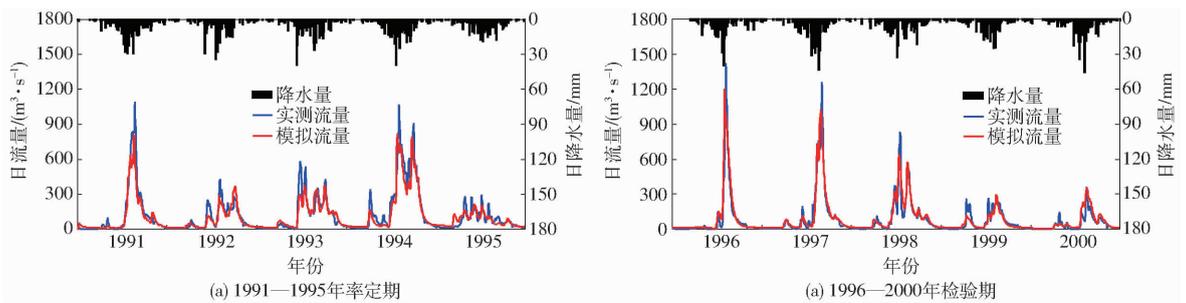


图 3 校正产流参数的 GSAC 模型对呼兰河兰西站日流量模拟结果

Fig. 3 GSAC model simulation results at Lanxi station over Hulan River with adjusted runoff parameters

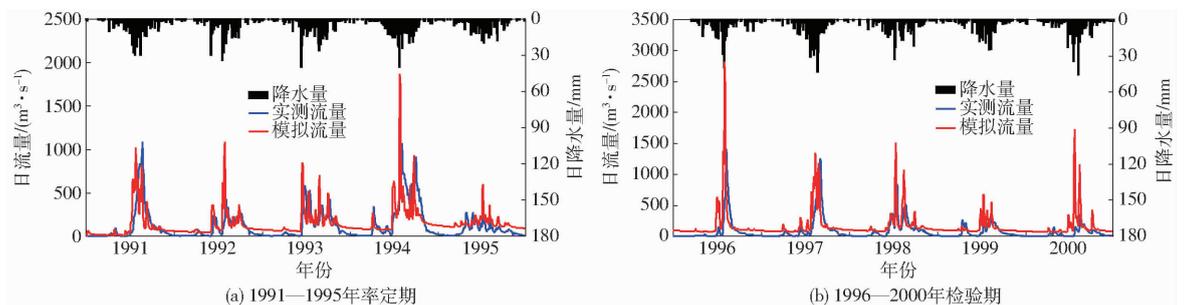


图 4 不校正产流参数的 GSAC 模型对呼兰河兰西站日流量模拟结果

Fig. 4 GSAC model simulation results at Lanxi station over Hulan River without adjusted runoff parameters

表 2 GSAC 模型对呼兰河兰西站日流量的模拟精度 (NSEC)

Tab. 2 Simulation accuracy of GSAC model at Lanxi station over Hulan River

项目	年份									
	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
校正产流参数	0.88	0.78	0.82	0.90	0.67	0.81	0.91	0.90	0.75	0.76
不校正产流参数	0.47	-0.76	0.08	0.23	-0.90	-1.11	0.25	-0.18	-1.04	-11.44

规定的精度等级。另据统计,在1991—2000年间,校正产流参数的GSAC模型模拟兰西站年径流量的相对误差为 $-15.73\% \sim 31.04\%$,而不校正参数的GSAC模型模拟的相对误差为 $-0.34\% \sim 241.75\%$,可见,利用HWSO土壤属性数据估计的网格化产流参数仍需校正,从而使GSAC模型达到更好的模拟精度。

4 结论

(1)实证流域表明,利用HWSO土壤属性数据首先估算T、S层土壤水分常数,再转化为GSAC模型上、下层的土壤水分常数,进而估计GSAC模型产流参数的方法是可行的,能够实现GSAC产流参数的网格化,所得产流参数可达到与HWSO一致的

30"空间分辨率。

(2)由于土壤数据库与流域实际土壤的差异,不宜直接采用HWSO估计的产流参数,应对这些产流参数进行必要的校正;与不校正产流参数的情况相比,采用12个系数校正产流参数的GSAC模型对呼兰河流域日流量的模拟精度更高。

(3)提出的利用12个系数校正GSAC模型产流参数的方法简便易行,这些系数可以随水文模型其他参数一起率定,其数目也不再随流域尺度的加大或土壤类型的增多而增加。

(4)在土壤水分常数与产流参数计算、土层厚度校正等方面,文中采用的一些公式仍是经验性的,还需发展和完善,有条件情况下应结合流域实地调查工作进行校正。

参 考 文 献

- 1 长办水文局. 水文预报模型译文集[M]. 武汉:全国水文科技情报网,1981.
- 2 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型与陕北模型[M]. 北京:水利电力出版社,1984.
- 3 赵人俊. 流域水文模型比较分析研究[J]. 水文,1989,9(6):1-5.
- 4 翟家瑞. 常用水文预报算法和计算程序[M]. 郑州:黄河水利出版社,1995.
- 5 关志成. 寒区流域水文模拟研究[D]. 南京:河海大学,2002.
GUAN Zhicheng. Hydrological simulation of cold zone in China[D]. Nanjing: Hohai University, 2002. (in Chinese)
- 6 关志成,朱元胜,段元胜,等. 扩展的萨克拉门托模型在寒冷地区的应用[J]. 水文,2002,22(2):36-39.
GUAN Zhicheng, ZHU Yuanshen, DUAN Yuansheng, et al. Application of expended Sacramento model in the north [J]. Journal of China Hydrology, 2002, 22(2): 36-39. (in Chinese)
- 7 包为民. 水文预报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- 8 王斌,黄金柏,宫兴龙,等. Free Search算法率定的Sacramento模型在东北寒旱区的应用[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(6):171-177. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160622&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.022.
WANG Bin, HUANG Jinbai, GONG Xinglong, et al. Application of Sacramento model calibrated by Free Search algorithm in cold and arid region of Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 171-177. (in Chinese)
- 9 王斌,王贵作,黄金柏,等. 栅格分布式水文模型在高寒区日流量模拟中的应用[J]. 水力发电学报,2013,32(6):36-42.
WANG Bin, WANG Guizuo, HUANG Jinbai, et al. Distributed hydrological model based on grid and its application to daily runoff simulation for high-cold region[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 36-42. (in Chinese)
- 10 戚颖. 三江平原典型流域土地覆被变化对水资源的影响研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2015.
QI Ying. Research on the effects of land cover change of typical basin in Sanjiang Plain [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015. (in Chinese)
- 11 白雪峰,王斌,戚颖. 土地覆被变化对径流量影响的GSAC模型分析[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7):257-264. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170732&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.032.
BAI Xuefeng, WANG Bin, Qi Ying. Impacts of land cover change on runoff based on grid-based Sacramento model [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):257-264. (in Chinese)
- 12 KOREN V, SMITH M, WANG D, et al. Use of soil property data in the derivation of conceptual rainfall-runoff model parameters [C]//15th Conference on Hydrology, 2000:103-106.
- 13 KOREN V, SMITH M, DUAN Q. Use of a priori parameter estimates in the derivation of spatially consistent parameter sets of rainfall-runoff models[M]//DUAN Q, GUPTA H V, SOROOSHIAN S, et al. Calibration of Watershed Models. Washington: American Geophysical Union, 2003:239-254.
- 14 KOREN V, REED S, SMITH M, et al. Hydrology laboratory research modeling system (HL-RMS) of the US national weather service[J]. Journal of Hydrology, 2004, 291(3):297-318.
- 15 KUZMIN V, SEO D J, KOREN V. Fast and efficient optimization of hydrologic model parameters using a priori estimates and stepwise line search[J]. Journal of Hydrology, 2008, 353(1-2):109-128.
- 16 ANDERSON R M, KOREN V I, REED S M. Using SSURGO data to improve Sacramento model a priori parameter estimates[J]. Journal of Hydrology, 2006, 320(1):103-116.

- 40 NISBET J C T, LAGOY P K. Toxic Equivalence Factors(TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1992, 16(3): 290 - 300.
- 41 TSAI P J, SHIH T S, CHEN H L, et al. Assessing and predicting the exposures of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their carcinogenic potencies from vehicle engine exhausts to highway toll station workers[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(2): 333 - 343.
- 42 薛海全. 典型农作物中多环芳烃和多氯联苯的分布、累积规律[D]. 济南: 山东大学, 2011.
XUE H Q. Accumulations and distributions of PAHs, PCBs in typical crops [D]. Ji'nan: Shandong University, 2011. (in Chinese)
- 43 万开, 江明, 杨国义, 等. 珠江三角洲典型城市蔬菜中多环芳烃分布特征[J]. *土壤*, 2009, 41(4): 583 - 587.
WAN K, JIANG M, YANG G Y, et al. Distribution characteristics of PAHs in vegetables of typical city in Pearl River Delta [J]. *Soils*, 2009, 41(4): 583 - 587. (in Chinese)
- 44 于国光, 王铁冠, 吴大鹏, 等. 北京市大气气溶胶中多环芳烃的研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2008, 37(1): 72 - 78.
YU G G, WANG T G, WU D P, et al. A study of polycyclic aromatic hydrocarbons present in Beijing aerosols [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008, 37(1): 72 - 78. (in Chinese)
- 45 王超, 张霖琳, 刀谏, 等. 京津冀地区城市空气颗粒物中多环芳烃的污染特征及来源[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(1): 1 - 6.
WANG C, ZHANG L L, DAO X, et al. Pollution characteristics and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons in airborne particulates of Beijing - Tianjin - Hebei Region, China [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(1): 1 - 6. (in Chinese)
- 46 GB2672—2012 食品中污染物限量[S]. 2012.
- 47 FABBRI D, VASSURA I, SUN C G, et al. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in a coastal lagoon by molecular and isotopic characterization [J]. *Marine Chemistry*, 2003, 84: 123 - 135.
- 48 MCCREADY S, SLEE D J, BIRCH G F, et al. The distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in surficial sediments of Sydney Harbor, Australia [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40(11): 999 - 1006.
- 49 U S. EPA. Risk assessment guidance for superfund (RAGS), Volume I: human health evaluation manual (HHEM), supplemental guidance, standard default exposure factors, interim guidance, Directive. Washington, DC, OSWER: Office of Emergency and Remedial Response, 9285.6 - 03.1, 1991.
- 50 冯焕银, 傅晓钦, 赵倩, 等. 宁波土壤中多环芳烃的健康风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(10): 1998 - 2004.
FENG H Y, FU X Q, ZHAO Q, et al. Health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Ningbo area, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10): 1998 - 2004. (in Chinese)

(上接第 256 页)

- 17 王斌, 黄金柏, 宫兴龙. 基于 HWSD 的流域栅格土壤水分常数估算[J]. *水文*, 2015, 35(2): 8 - 11.
WANG Bin, HUANG Jinbai, GONG Xinglong. Grid soil moisture constants estimation based on HWSD over basin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2015, 35(2): 8 - 11. (in Chinese)
- 18 KOREN V, MOREDA F, SMITH M. Use of soil moisture observations to improve parameter consistency in watershed calibration [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2008, 33(17 - 18): 1068 - 1080.
- 19 ZHANG Z, KOREN V, REED S, et al. SAC - SMA a priori parameter differences and their impact on distributed hydrologic model simulations [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 420 - 421: 216 - 227.
- 20 ZHOU M, ISHIDAIRA H, HAPUARACHCHI H P, et al. Estimating potential evapotranspiration using Shuttleworth - Wallace model and NOAA - AVHRR NDVI data to feed a distributed hydrological model over the Mekong River basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 327(1 - 2): 151 - 173.
- 21 PENEV K, LITTLEFAIR G. Free search—a comparative analysis [J]. *Information Sciences*, 2005, 172(1 - 2): 173 - 193.
- 22 王斌, 张展羽, 张国华, 等. 一种新的优化灌溉制度算法—自由搜索[J]. *水科学进展*, 2008, 19(5): 736 - 741.
WANG Bin, ZHANG Zhanyu, ZHANG Guohua, et al. Free search: a novel algorithm for optimizing irrigation schedule [J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(5): 736 - 741. (in Chinese)
- 23 王斌, 张展羽, 张国华, 等. 基于自由搜索的灌区优化配水模型研究[J]. *水利学报*, 2008, 39(11): 1239 - 1243.
WANG Bin, ZHANG Zhanyu, ZHANG Guohua, et al. Optimized water rationing model based on free search for irrigation district [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(11): 1239 - 1243. (in Chinese)
- 24 李强. 松花江呼兰河流域水文特性[J]. *东北水利水电*, 2007, 25(3): 40 - 41.
LI Qiang. The hydrological characteristics of Hulan River Basin [J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2007, 25(3): 40 - 41. (in Chinese)
- 25 GB/T 22482—2008 水文情报预报规范[S]. 2008.