

降水时间降尺度方法对蒸散发模拟的影响

曹小磊^{1,2}, 周祖昊^{2,3}, 王子茹¹

(1. 大连理工大学, 辽宁 大连 116086; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;
3. 水利部 水资源与水生态工程技术研究中心, 北京 100038)

摘要: 为了解雨强历时过程对地表蒸散发的影响作用, 分别采用 IBIS 模型自带的天气发生器和一种基于雨强历时关系的降尺度模型, 对长白山地区的日降水进行了降尺度模拟计算, 并以计算的小时降水为驱动, 利用 IBIS 模型对地区蒸散发进行模拟。对比分析的结果表明, IBIS 模型自带的天气发生器模拟的降水强度明显偏低, 导致地表蒸散发模拟结果偏大, 而雨强历时模型可以较好地模拟降水和蒸散发过程。这说明降水模拟精度的提高有利于促进地表蒸散发的模拟效果, 进而提高水循环过程的模拟精度。此外, 针对两场不同雨量的降水, 对比分析不同雨强和历时方案下蒸散发的变化, 指出在日降水量相同的情况下, 在雨强大、历时短的降水过程中, 地表蒸散发总量较小, 截留蒸发所占的比重较小, 而土壤蒸发和植被蒸腾所占比重较大。

关键字: 降雨; 降尺度; 蒸散发; IBIS 模型

中图分类号: P468 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1031-05

Effects of precipitation downscaling method on evapotranspiration simulation of land surface model

CAO Xiaolei^{1,2}, ZHOU Zuhao^{2,3}, WANG Ziru¹

(1. Dalian University of Technology, Dalian 116086, China; 2. China Institution of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Engineering and Technology Research Center for Water resources and Hydroecology of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to recognize the effects of precipitation intensity and duration on the evapotranspiration, temporal downscaling simulation of daily precipitation in Changbaishan area is conducted using the weather generator of IBIS (Integrated Biosphere Simulator) model and a precipitation downscaling model based on precipitation intensity and duration. The calculated hourly precipitation is used as the meteorological drive and evapotranspiration is simulated using the IBIS model. The results show that the precipitation intensity simulated by the weather generator of IBIS model is obviously lower, leading to a higher evapotranspiration, while the results from the precipitation downscaling model match the observation data well. The accuracy of evapotranspiration simulation can be improved with the accurate precipitation downscaling. In addition, through the comparison of evapotranspiration variation under different schemes of precipitation intensity and duration based on two precipitation events in 2004, stronger precipitation intensity and shorter precipitation duration can decrease the total evapotranspiration and the proportion of canopy interception evaporation, and increase the proportion of soil evaporation and plant transpiration under the same daily precipitation.

Key words: precipitation; downscaling; evapotranspiration; IBIS model

地表蒸散发是土壤-植物-大气连续体水量平衡和能量平衡的关键参量, 同时也是气候变化研究的重要指标, 因此合理地估算地表蒸散发对评价和管理气候变化背景下水资源、生态环境和农业生产有着重要的指导意义^[1]。地表蒸

散发与地区的气候条件、下垫面情况相关^[2], 主要受太阳辐射、气温、相对湿度和风速等气象因子的影响^[3]。而在小时尺度上, 降水量和降水强度影响植被冠层截留和土壤下渗过程^[4], 进而影响地表的蒸散过程^[5]。

收稿日期: 2014-08-12 修回日期: 2015-09-03 网络出版时间: 2015-11-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151103.1031.010.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51179203); 国家水体污染控制与治理科技重大专项课题(2008ZX07207-006; 2012ZX07201-006); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51109222; 51309248; 51309245); 中国水利水电科学研究院科研专项(ZJ1224)

作者简介: 曹小磊(1984), 女, 山西大同人, 博士研究生, 主要从事生态水文方面研究。E-mail: cxl1114@gmail.com

通讯作者: 周祖昊(1975), 男, 湖北武汉人, 教授级高级工程师, 主要从事流域水循环模拟与调控方面的研究。E-mail: zhzh@iwhr.com

降水过程和强度通过对水文循环的影响进而作用于土壤侵蚀和植被生长等过程^[6],是地表生态水文过程的主要驱动因素。降水过程的模拟精度直接影响陆面生态水文过程的模拟效果,然而实测降水资料往往无法满足生态水文模型要求的时空精度,需要通过随机模拟方法,模拟不同时间和空间尺度上的降水,作为模型的气象驱动。对于单个站点日降水降尺度研究,最基本的方法是利用站点的降水观测数据,统计分析降水特性,如最大降水强度、降水历时、开始时间和雨强历时分布规律^[7,8],再根据降水在不同时间尺度上的相关关系,计算小时降水过程。而对于大的地区或流域进行日降水的降尺度计算时,则需要根据地区的气候特点和降水特征进行分区,分别统计各分区的降水特征及其相关关系,据此进行降尺度计算^[9]。很多大尺度的陆面模型、水文模型也都自带的降水天气发生器,用于陆面水量和能量平衡的模拟,如 IBIS^[10] (Integrated Biosphere Simulator)、SWAT^[11] (Soil and Water Assessment Tool) 等,然而模型自带的天气发生器 (WGEN^[12]、WXGEN^[13]) 主要针对日降水进行统计分析和计算,对于小时降水的计算比较简单,导致小时降水的计算结果偏差较大。为了了解小时降水过程的模拟效果在陆面水循环模拟的重要作用,本文分别利用 IBIS 模型自带的天气发生器和雨强历时模型对长白山地区的小时降水和表蒸散发过程进行模拟,并针对两场不同雨量的降水,设置不同的雨强历时方案,据此分析其对地表蒸散发模拟的影响。

1 方法介绍

1.1 IBIS 模型介绍

IBIS (Integrated Biosphere Simulator) 是美国威斯康辛大学研制的面向生物圈和区域尺度的动态植被模型,用于模拟陆地的水循环、能量平衡、植被生理过程、物候过程、土壤有机质分解和动态演替等过程。根据时间步长和研究内容,模型可分为陆面过程、植被物候、植被动态和土壤生物化学 4 个模块^[10,14]。

IBIS 模型模拟陆面水循环以小时为时间步长,主要考虑了降雨生成、冠层截留、截留蒸发、土壤蒸发、蒸腾、土壤入渗、地表产流和地下排水等过程。模型采用 LSX (Land Surface Transfer Scheme) 陆面模式模拟大气-植被-土壤连续体的空气动力、能量和水量的交换过程,估算地表蒸散发。蒸散发包括了上冠层和下冠层植被的冠层截留蒸发、植被蒸腾以及土壤表层和冰雪表层蒸发,具体的计算过程见相关文献^[15]。

IBIS 模型利用 WGEN 天气发生器对气象数据进行降尺度处理。其中由日降水量计算小时降水的步骤为^[14]: (1) 随机生成降水时间 Tlength 和开始时间 Tstart, 计算结束时间为 Tend, 假设 Tlength > 4 h, 且 < 24 h; (2) 在降水时间内平均分配日降水量, 得到小时降水 Pht, 如果小时降水大于 15 mm, 则通过增加降水时长来降低小时降水量。

结合我国东北地区的特点, 本研究对 IBIS 模型的部分参数进行了调整, 其中与蒸散发模拟的相关参数取值见表 1^[10,15-17]。

表 1 IBIS 模型参数

Tab. 1 IBIS model parameters

代码	含义	取值
wliqumax	上冠层叶片最大截留量/mm	0.2
wliqsmx	上冠层枝干最大截留量/mm	0.4
wliqlmax	下冠层茎叶最大截留量/mm	0.2
tdrip	冠层截留衰减时间/h	2
γ	呼吸系数	0.05/0.03*
m	气孔导度系数	10/8
b	气孔导度系数	0.02/0.01
dleaf	叶片的空气动力通量参数	0.1
dstem	枝干的空气动力通量参数	0.1
cleaf	上冠层叶片的空气传导系数	0.01
cstem	上冠层枝干的空气传导系数	0.01
cgrass	下冠层茎叶的空气传导系数	0.01

注: * 为生理参数,“/”前后分别表示阔叶植物和针叶植物的取值。

1.2 雨强历时模型

模型假设每个降水日内只有一次降水,且雨强随时间呈单峰分布的,雨强分布规律可用式(1)表示。

$$i = S/T^n \quad (1)$$

式中: i 为降水历时 T 内最大降雨量的平均雨强; S 为单位时段最大雨强; n 为雨强衰减系数,与降水特征有关,可以用实测资料进行率定。

具体利用日降水量计算小时降水的过程如下^[9]。

(1) 将实测日降水量 H 和降水历时 T 带入公式(1)对衰减系数 n 进行率定。

$$H = iT = S/T^{n-1} \quad (2)$$

根据长白山生态站的实测降水特征,确定参数 n 的取值为 0.42。在对日降水量进行降尺度计算时,日降水量 H 是已知的,所以只要知道 S 或者 T 中任意一个的值,可根据式(2)计算另一个,进而可以推求当天的小时降水过程。

(2) 根据地区降水特点,建立雨量雨强关系模型,见公式(3)。通过日降水量计算最大雨强 S 。

$$S = aH + b + \epsilon \quad (3)$$

式中: a 、 b 为参数,通过地区实测的日降水量和最大雨强进行率定, a 的取值为 0.37, b 的取值为 0.66; ϵ 为残差。

(3) 根据公式(2)反推降水历时 T 。

(4) 随机生成降水的初始时刻 T_{start} , $T_{start} + T$ 应小于 24。

(5) 根据计算的降水历时关系,计算时段 t 的降水累积量 P_t 。

$$P_t = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[H - \frac{S}{T^{n-1}} \right] & t < T_{start} + \frac{T}{2} \\ \frac{1}{2} H & t = T_{start} + \frac{T}{2} \\ \frac{1}{2} \left[H + \frac{S}{T^{n-1}} \right] & t > T_{start} + \frac{T}{2} \end{cases} \quad (4)$$

(6) 根据累计降水量反推时段 t 的小时降水量 Ph_t 。

$$Ph_t = P_t - P_{t-1} \quad (5)$$

2 研究区和研究数据

研究的模拟地点选在第二松花江上游的长白山森林生态站(128°05' E, 42°24' N), 海拔 784 m。该地区属于温带大陆性

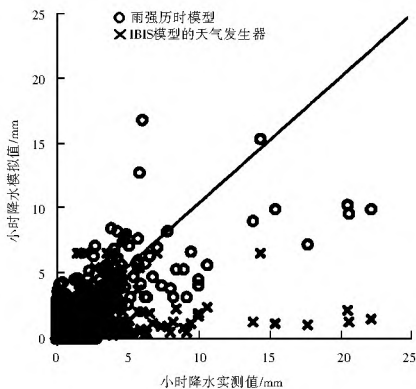
山地气候,多年平均温度 3.5 °C,年降水 700~800 mm。多年平均湿度 71%~72%,平均干燥度 0.53,地带性植被为阔叶红松林,棕色针叶林土是本地区最具有代表性的土壤类型。

研究的降水数据来自中国生态系统研究网络(CERN, www.cern.ac.cn)长白山森林生态站的实测通量数据,时间序列为 2003 年~2005 年,时间尺度为 30 min,用于统计研究区日降水量、最大降水强度、降水历时等特征,确定雨强历时模型的计算参数。根据降水资料统计,2003 年~2005 年的年降水量分别为 618 mm、579 mm 和 736 mm,1956 年~2010 年的降水系列均属于枯水年份。用于模型验证的 2004 年蒸散发数据来自 CERN 的通量观测数据,由 30 min 通量观测数据统计为日数据,具体数据观测方法见参考文献[18-20]。

3 结果分析

3.1 降水模拟验证

由于 IBIS 模型自带的天气发生器具有随机性,研究利用天气发生器的 100 次降水降尺度计算结果与雨强历时模型进行对比分析。对长白山森林生态站 81 场大于 5 mm 的



降水分别进行降尺度计算,雨强历时模型和某次天气发生器计算的小时降水和最大降水强度结果见图 1。在降水强度较小的情况下,两个模型模拟的小时降水在 1:1 对角线附近相对集中;在降水强度较大的情况下,雨强历时模型模拟结果相对发散,天气发生器的模拟结果则明显偏低。雨强历时模型模拟的最大降水强度均匀分布在 1:1 对角线的两侧,天气发生器模拟的最大降水强度明显偏低。

在日降水量一定的情况下,降水强度对陆面的截留、蒸发、入渗、产流等过程影响显著,因此在对日降水进行降尺度处理时,主要关心的是降水强度的大小分布^[9]。本文选用纳什效率系数(Nash Sutcliffe Efficiency coefficient, NSE)和相关系数(R)对比分析降水模拟效果。雨强历时模型计算的小时降水的 NSE 为 0.65,与实测降水的相关系数为 0.81;天气发生器 100 次计算,得到的 NSE 范围为 0.11~0.26,与实测值的相关系数范围为 0.36~0.51。可见,天气发生器计算的小时降水精度相对较差,而雨强历时模型计算的小时降水与实测结果更为接近。

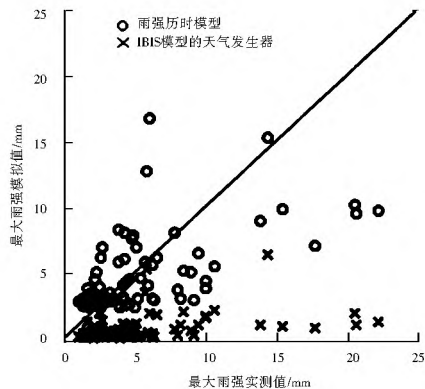


图 1 小时降水降尺度模拟结果对比

Fig. 1 Comparison of simulated and observed hourly precipitation

3.2 蒸散发模拟验证

以 2004 年数据为例,利用不同的降水降尺度方法耦合在 IBIS 模型中对研究区的蒸散发进行模拟。2004 年研究区的降水量为 579 mm,实际蒸散发为 452 mm。利用雨强历时模型模拟的蒸散发为 450 mm,相对误差为 -0.63%;而利用 IBIS 模型自带的天气发生器模拟的 100 次降水结果计算的蒸散发为 503~510 mm,相对误差范围为 11.38%~12.82%。结合蒸散发过程模拟结果(图 2)可以看出,利用雨强历时模型计算的蒸散发不仅在总量上,而且在年内过程模拟效果上也优于天气发生器。另外,利用雨强历时模型模拟的日蒸散发的 NSE 为 0.84;而利用模型自带的天气发生器模拟的蒸散发 NSE 为 0.69~0.72。

利用 IBIS 自带的天气发生器计算的蒸散发在某些情况下明显偏大,这是由于天气发生器具有随机性,导致某些降水日的降水历时偏长、降水强度偏低,使模型在模拟地表水循环过程中,大部分的降水通过截留和入渗过程被储存在植被和土壤中,最后以蒸散发的形式回到大气中,造成地表蒸散发模拟明显偏大。而雨强历时模型计算的小时降水过程

与实测过程更为接近,因此,依托该方法模拟的蒸散发与实测值也较为接近,降水过程模拟精度的提高相应地改善了地表蒸散发的模拟效果。

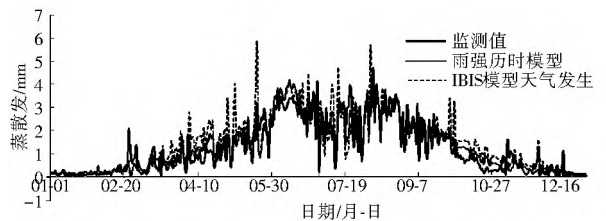


图 2 不同降雨降尺度方法计算的地表蒸散发模拟对比

Fig. 2 Comparison of simulated and observed daily evapotranspiration

4 降尺度方法对蒸散发模拟的影响

4.1 方案设置

长白山地区夏季降水充沛,植被覆盖度和 LAI 较高,地表蒸散发量大。为了了解不同的雨强历时过程对地表蒸散发的影响作用,本文针对 2004 年夏季的两场不同雨量的降水(降水 1:2004 07-19 场次降水,降水量 52.8 mm;降水 2:2004 05-20 场次降水,降水量 14.4 mm),采用三种雨强历时方案对

地表蒸散发及其组成成分项进行模拟分析: 方案一采用 IBIS 模型自带的天气发生器计算, 方案二和方案三采用雨强历时模型, 分别采用不同的参数计算。各方案的参数值见表 2。

表 2 降水方案设置

Tab. 2 Tab. 2 Precipitation schemes

方案	降水特征	小时降水计算
方案一	雨强固定, 降水历时较长	WGEN 天气发生器
方案二	雨强呈尖瘦单峰过程, 降水历时较短	雨强历时模型: $a=0.40$; $b=0.50$; $n=0.4$
方案三	雨强呈平缓单峰过程, 降水历时较长	雨强历时模型: $a=0.25$; $b=0.50$; $n=0.5$

利用不同方案计算的小时降水过程见图 3。对于降水 1, 方案一降水历时 11 h, 降水强度均为 4.8 mm/h; 方案二降水历时 6 h, 最大降水强度 18.14 mm/h; 方案三降水历时 16 h, 最大降水强度 11.32 mm/h。对于降水 2, 方案一降水历时 20 h, 降水强度均为 0.72 mm/h; 方案二降水历时 5 h, 最大降水强度 6.26 mm/h; 方案三降水历时 13 h, 最大降水强度 3.94 mm/h。可见方案二的雨型为尖瘦型, 而方案一和方案三的雨型则较为平缓。

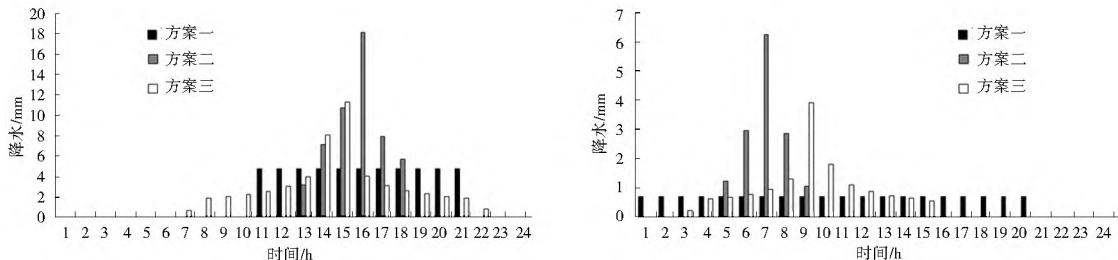


图 3 不同方案计算的降雨过程分布

Fig. 3 Distribution of precipitation processes under different schemes

表 3 不同降水过程下水循环变化

Tab. 3 Variations of water cycle with different precipitation processes

降水量/mm	方案	降水历时/h	最大雨强/(mm·h ⁻¹)	蒸散发量/mm	地表产流量/mm	表层土壤含水量(%)	截留量/mm
52.8	方案一	11	4.8	1.25	12.41	0.435	4.86
	方案二	6	18.14	1.18	26.82	0.417	2.94
	方案三	16	11.32	1.33	11.5	0.440	6.44
14.4	方案一	20	0.72	5.97	0	0.384	5.3
	方案二	5	6.26	2.71	0	0.397	1.9
	方案三	13	3.94	4.26	0	0.390	3.43

不同雨强历时方案下的蒸散发组成成分项见表 4, 尽管在不同的气象条件和降水条件下, 截留蒸发、土壤蒸发和植被蒸腾所占比重不同, 但仍可以看出, 不同的雨强历时过程不仅影响地表蒸散发量, 而且影响地表蒸散发的比重。从表 4 中可以看出, 在降水强度越大、降水历时越短的情况下, 冠层截留蒸发量所占比重较小, 而土壤蒸发量和植被蒸腾量所占比重越大。LSX 陆面模式认为冠层截留会减小干燥叶片的比例, 减小冠层的气孔导度和光合能力^[4], 因此在尖瘦雨型的情况下, 冠层截留比例较小, 干燥叶片面积较大, 且干燥时间较长, 植被冠层的气孔导度和光合速率较高, 促进植被的蒸腾作用。

5 结论

本文以 IBIS 模型为基础, 利用 IBIS 模型自带的天气发

4.2 降水过程对蒸散发的影响

不同雨强历时方案下的水循环各项变量见表 3, 其中表层土壤含水量为地表 10 cm 土壤的平均含水量。在降水 1 的情景下, 三个方案计算的蒸散发量分别为 1.99 mm、1.86 mm 和 2.11 mm。由于暴雨天气, 温度、湿度等气象要素会降低地表蒸散发能力, 蒸散发量较降水而言相对较小, 但仍可看出, 在日降水量相同的情况下, 不同的降水过程会导致不同的地表蒸散发量。在降水 2 的情景下, 三个方案计算的蒸散发量分别为 5.86 mm、2.72 mm 和 4.26 mm, 蒸散发量受雨强历时过程的影响更为明显。两场降水过程中蒸散发与降水之间的关系一致, 即降水强度大、降水历时短的情况下, 地表蒸散发量相对较小。同时从表 3 中还可以看出, 在降水强度大、降水历时短的情况下, 即雨型为尖瘦型, 冠层截留量较小。土壤水分变化规律则与降水量有关, 如果降水量较小, 地表不产流, 在尖瘦雨型的情况下, 冠层截留较小, 导致土壤水分相对较大; 而如果降水量较大, 产生地表径流, 在尖瘦雨型的情况下, 冠层截留和土壤拦截水量都较小, 因此产生的径流量相对较大。

生器和雨强历时模型两种不同的降水降尺度方法将日降水量分解到小时尺度, 并以计算的小时降水模拟长白山地区的地表蒸散发, 最后针对 2004 年两场不同大小的降水, 分方案讨论了雨强历时过程对地表蒸散发的影响作用, 结果如下。

(1) 雨强历时模型可以较好地模拟长白山地区的小时降水过程, 较 IBIS 模型自带的天气发生器有明显的提高, 其 NSE 从 0.11~0.26 提高到了 0.65, 相关系数由 0.36~0.51 提高到了 0.81。

(2) 降水历时过程在地表蒸散发模拟中具有重要作用, 小时降水模拟精度的提高有助于提高蒸散发的模拟精度, 用雨强历时模型代替 IBIS 模型的天气发生器, 模型模拟的蒸散发 NSE 由原来的 0.69~0.72 提高到 0.84, 相对误差由 11.38%~12.82% 降低到 -0.63%。

表4 不同降水过程下蒸散发组成变化

Tab. 4 Variations of the component of evapotranspiration with different precipitation processes

降水量/mm	方案	蒸散发/mm	截留蒸发		土壤蒸发		植被蒸腾	
			蒸发量/mm	比例(%)	蒸发量/mm	比例(%)	蒸发量/mm	比例(%)
52.8	方案一	1.25	1	80.00	0.02	1.60	0.23	18.40
	方案二	1.18	0.84	71.19	0.04	3.39	0.29	24.58
	方案三	1.33	1.15	86.47	0.02	1.50	0.17	12.78
14.4	方案一	5.97	4.81	80.57	0.76	12.73	0.41	6.87
	方案二	2.71	0.68	25.09	1.12	41.33	0.91	33.58
	方案三	4.26	2.72	63.85	0.94	22.07	0.60	14.08

(3) 在日降水量相同的情况下,不同的雨强历时过程会影响降水的分配。一般在降水强度越大、降水历时越短的情况下,植被冠层和土壤拦截水量相对较小,地表产流量较大,大部分降水以径流的形式汇入河网,储存在植被和土壤中的水分较少,导致地表蒸散发总量减少。

研究结果表明,在小区域的水循环模拟研究中,利用单个或多个站点的降水数据统计分析得到小尺度降水数据,可较好地应用于模型模拟中。而对大的流域或地区的地表蒸散发或水循环进行模拟时,则需要更多的降水实测资料,将降水的空间降尺度方法与时间降尺度方法相结合,发展多维降水随机模型,为陆面模型提供更为精确的小尺度降水数据。此外,IBIS模型在计算地表蒸散发时考虑了植被冠层的截留和蒸发过程,但是忽略了地表枯落物的截留和蒸发过程,应加强相关的机理研究和模拟研究。

致谢:特别感谢中国科学院地理科学与资源研究所占车生老师对本研究的支持和指导,以及中国生态系统研究网络(CERN)提供的数据支持。

参考文献(References):

[1] 王书功,康尔泗,金博文,等.黑河山区草地蒸散发量估算方法研究[J].冰川冻土,2003,25(5):558-565. (WANG Shu gong, KANG Er si, JIN Bo wen, et al. A study of estimation of evapotranspiration on grass land in the mountains of Hei River Basin [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(5): 558-565. (in Chinese))

[2] 莫兴国,刘苏峡,林忠辉,等.华北平原蒸散和GPP格局及其对气候波动的响应[J].地理学报,2011,66(5):589-598. (MO Xing guo, LIU Su xia, LIN Zhong hui, et al. Patterns of evapotranspiration and GPP and their responses to climate variations over the North China Plain [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 589-598. (in Chinese))

[3] 韩松俊,胡和平,杨大文,等.塔里木河流域山区和绿洲潜在蒸散发的不同变化及影响因素[J].中国科学E辑:技术科学,2009,39(8):1375-1383. (HAN Song jun, HU He ping, YANG Da wen, et al. Differences in changes of potential evaporation in the mountainous and oasis regions of the Tarim Basin, Northwest China [J]. Science China E: Technological Sciences, 2009, 39(8): 1375-1383. (in Chinese))

[4] 芮孝芳.水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社,2004. (RUI Xiao fang. The principle of hydrology [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2004. (in Chinese))

[5] 常志勇,包维楷,何其华,等.岷江上游辽东栎与川榛在模拟降雨过程中蒸散特征研究[J].水土保持研究,2009,16(1):78-

83. (CHANG Zhi yong, BAO Wei kai, HE Qi hua, et al. Evapotranspiration simulation of Quercus liaotungensis and Corylus heterophylla var. sutchuenensis. Franch during rainfall process in the upper reaches of Minjiang River [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(1): 78-83. (in Chinese))

[6] 殷水清,谢云,陈德亮,等.日以下尺度降雨随机模拟研究进展[J].地球科学进展,2009,24(9):981-989. (YIN Shui qing, XIE Yun, CHEN De liang, et al. Review of stochastic simulation of sub-daily scale precipitation [J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(9): 981-989. (in Chinese))

[7] Liu Y, Xia J. The Study of Temporal Downscaling method of Short-period Precipitation Based on Statistical Analysis [J]. JOURNAL OF NATURAL RESOURCES, 2008, 23(6): 1088-1098.

[8] 叶爱中,戴永久,夏军.降雨时间尺度上的降尺度分析研究[J].水文,2007,27(5):16-20. (YE Ai zhong, DAI Yong jiu, XIA Jun. SL/XR comparative test and precision analysis [J]. Journal of China Hydrology, 2007, 27(5): 16-20. (in Chinese))

[9] 周祖昊,王浩,贾仰文,等.缺资料地区日降雨时间上向下尺度化方法探讨—以黄河流域为例[J].资源科学,2005,27(1):92-96. (ZHOU Zu hao, WANG Hao, JIA Yang wen, et al. Temporal downscaling daily precipitation in lack data watershed a case study in Yellow River [J]. Resources Science, 2005, 27(1): 92-96. (in Chinese))

[10] Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, et al. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics [J]. Global Biogeochem Cycles, 1996, 10: 603-628.

[11] Arnold J G, Williams J R, Nicks A D, et al. A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management [M]. Texas: A&M University Press, 1990.

[12] Richardson C W. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation [J]. Water Resources Research, 1981, 17: 182-190.

[13] Sharples A N, Williams J R. EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator, 1. Model documentation [M]. Washington: U. S. Dept of Agriculture Agricultural Research Service, 1990.

[14] Kucharik C J, Foley J A, Delire C, et al. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance, and vegetation structure. Global Biogeochem Cycles, 2000, 14: 795-825.

[15] Pollard D, Thompson S L. Use of land surface transfer scheme (LSX) in a global climate model: the response to doubling stomatal resistance [J]. Global and Planetary Change, 1995, 10: 129-161.

(下转第1039页)

- Press, 2011. (in Chinese))
- [2] 邢贞相, 付强, 芮孝芳. 两种实用的洪灾损失频率分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 2006(2): 127-132. (XING Zhenxiang, FU Qiang, RUI Xiaofang. Two practical methods on the analyses of inundation loss frequency[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2006(2): 127-132. (in Chinese))
- [3] 耿鸿江. Excel 在 P-0 型分布频率计算中的应用研究[J]. 水电能源科学, 2002, 20(3): 41-43. (GENG Hongjiang. Study and application of excel in P-0 distribution frequency calculation[J]. Water Resources and Power, 2002, 20(3): 41-43. (in Chinese))
- [4] 王红芳, 丁晶, 王文圣, 等. 集对分析在频率拟合度定量评价中的应用[J]. 水利水电技术, 2007, 38(4): 1-15. (WANG Hongfang, DING Jing, WANG Wensheng, et al. Application of spa to quantitative evaluation on fitting of frequency curve[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(4): 1-15. (in Chinese))
- [5] 李宏伟, 宋松柏. 蚁群算法在水文频率曲线参数计算中的应用[J]. 人民黄河, 2009, 31(4): 38-40. [LI Hongwei, SONG Songbai. Application of ant colony algorithms in parameter calculation of hydrological frequency calculation[J]. Yellow River, 2009, 31(4): 38-40. (in Chinese))
- [6] 桑燕芳, 王栋, 吴吉春. 水文频率分析中参数估计 SAGA-ML 方法的研究[J]. 水文, 2009, 29(5): 23-29. (SANG Yanfang, WANG Dong, WU Jichun. Research on saga-ml method for parameter optimization in hydrologic frequency analysis[J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(5): 23-29. (in Chinese))
- [7] 刘力, 周建中, 杨俊杰, 等. 粒子群优化适线法在水文频率分析中的应用[J]. 水文, 2009, 29(2): 21-23. (LIU Li, ZHOU Jianzhong, YANG Junjie, et al. Discussion on the basic concept of water resources carrying capacity[J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(2): 21-23. (in Chinese))
- [8] 王柏勇. 三种参数估计方法在降雨频率分析中的比较研究[J]. 中国防汛抗旱, 2010(5): 42-45. (WANG Boyong. Research on three methods of parameter estimation for rainfall frequency analysis[J]. China Flood & Drought Management, 2010(5): 42-45. (in Chinese))
- [9] 许义和, 魏晓妹. 基于 Matlab 的 P-0 型曲线绘制软件的研发与应用[J]. 水电能源科学, 2010, 28(7): 15-17. (XU Yihe, WEI Xiaomei. Development and application of p-0 distribution curve drawing software based on matlab[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(7): 15-17. (in Chinese))
- [10] 梁忠民, 李磊, 王军, 等. 考虑参数和线型不确定性的水文设计值估计的贝叶斯方法[J]. 天津大学学报, 2010, 43(5): 379-384. (LIANG Zhongmin, LI Lei, WANG Jun, et al. Bayesian method for hydrological frequency analysis considering uncertainties of parameter and model[J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(5): 379-384. (in Chinese))
- [11] 孟彩侠, 徐芳, 张毅. Excel 在水文频率计算中的应用[C]. MACE 2011, 2922-2925. (MENG Caixia, XU Fang, ZHANG Yi. Application of excel in hydrologic frequency computation[C]. Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, 2011, 2922-2925. (in Chinese))
- [12] 冯平, 曾杭, 李新. 混合分布在非一致性洪水频率分析的应用[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2013, 46(4): 298-303. (FENG Ping, ZENG Hang, LI Xin. Non-Stationary flood frequency analysis based on mixed distribution[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology) 2013, 46(4): 298-303. (in Chinese))
- [13] 李扬, 宋松柏. 高阶概率权重矩在洪水频率分析中的应用[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2): 14-21. (LI Yang, SONG Songbai. Application of higher order probability-weighted moments to flood frequency analysis[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(2): 14-21. (in Chinese))
- [14] 中国水灾年表[EB/OL]. <http://www.chinacitywater.org/bbs/viewthread.php?tid=18719,2007-02-26>. (China flood chronological table[EB/OL]. <http://www.chinacitywater.org/bbs/viewthread.php?tid=18719,2007-02-26>. (in Chinese))
- [15] 王文圣, 张翔, 金菊良, 等. 水文学不确定性分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (WANG Wensheng, ZHANG Xiang, JIN Jiliang, et al. Methods of Uncertainty Analysis for Hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))

(上接第 1035 页)

- [16] 国庆喜, 张海燕, 王兴昌, 等. 东北典型森林土壤呼吸的模拟—IBIS 模型的局域化应用[J]. 生态学报, 2010, 30(9): 2295-2303. (GUO Qingxi, ZHANG Haiyan, WANG Xingchang, et al. Simulation of soil respiration for typical forests in Northeast China: localized application of IBIS[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(9): 2295-2303. (in Chinese))
- [17] 刘志理, 金光泽. 小兴安岭三种林型叶面积指数的估测[J]. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2437-2444. (LIU Zhi li, JIN Guangze. Estimation of leaf area index of three forest types in Xiaoxing'an Mountains of Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(9): 2437-2444. (in Chinese))
- [18] Yu R G, Wen X F, Sun X M, et al. Overview of ChinaFLUX and evaluation of its eddy covariance measurement. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 137: 125-137.
- [19] 李春, 何洪林, 刘敏, 等. ChinaFLUXCO₂ 通量数据处理系统与应用[J]. 地球信息科学, 2008, 10(5): 557-565. (LI Chun, HE Honglin, LIU Min, et al. The design and application of CO₂ flux data processing system at ChinaFLUX[J]. Geoinformation Science, 2008, 10(5): 557-565. (in Chinese))
- [20] 刘敏, 何洪林, 于贵瑞, 等. 中亚热带人工针叶林 CO₂ 通量组分统计不确定性分析[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(8): 1016-1027. (LIU Min, HE Honglin, YU Guirui, et al. Uncertainty analysis of CO₂ flux components in subtropical evergreen coniferous plantation[J]. Science China D: Earth Sciences, 2008, 38(8): 1016-1027. (in Chinese))