

气候变化对中国径流影响评估模型研究*

苏凤阁 谢正辉

中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟实验室, 北京 100029

摘要 以陆面参数化方案 VIC(variable infiltration capacity)为基础, 建立气候变化对中国径流影响评估模型. 全国共分 $60\text{ km} \times 60\text{ km}$ 网格 2604 个. 建立了与土地覆盖类型及土壤质地有关的全国 60 km 网格植被参数库和土壤参数库, 完成了 740 个站点包含 1980~1990 年 11 年日资料的强迫数据在全国 60 km 网格上的插值. VIC 模型在全国 2604 个网格上连续运行, 独立输出每个网格上 1980~1990 年的日径流深, 结果显示网格多年平均计算径流深与多年平均降水在空间分布上对应关系良好. 对淮河流域蚌埠以上区域及渭河部分流域的模拟与实测月流量过程进行了对比分析, 月过程峰形吻合较好. 初步表明所建评估模型具有一定的合理性与适应性.

关键词 陆面参数化方案 径流 评估模型

伴随着世界气候发生变化的是全球降水和气温时空分布的改变. 相应地, 年际径流量在大小与时空分布上亦随之发生变化. 许多水文模型已被发展和应用于研究未来气候变化对水文水资源的影响, 国际上有 SLURP 模型^[1]、HBV 模型^[2]、Macro-PDM^[3]等. 在国内针对不同的流域, 亦建立了一系列评估模型, 如黄河中下游^[4]、海河流域、长江中下游^[5]及淮河流域^[6]等. 这些模型主要是基于水量平衡的概念性水文模型, 能够以“离线”(off-line)的方式使用气候模型的输出结果, 模拟计算大流域的径流过程, 满足评估气候变化对径流影响的要求. 然而传统概念性水文模型有以下不足: (1) 多数参数需通过资料标定, 和地理特征的关系不直接; (2) 未显式考虑植被的作用; (3) 计算中未考虑能量平衡, 缺乏与气候模型的耦合能力.

陆面方案从简单的 Bucket 模型到复杂的 BATS、SiB 等生物模型, 这些参数化方案的主要目的是通过近地表的大气强迫, 给出陆面水分能量平衡的现实描述. 尽管最初发展陆面参数化方案是为了改善 GCM(general circulation model)中对陆面过程的描述, 水文气象工作者, 希望能够进行长时段预测的数值天气模型能为水资源管理者提供连续的

径流预测. 最近已有许多研究通过在 GCM 中加入汇流方案, 或以 SVATS(surface vegetation atmospheric transfer schemes)为平台构建大尺度水文模型, 在流域尺度或大陆尺度模拟径流^[7~9].

VIC(variable infiltration capacity)^[10, 11]模型作为 SVATS 的一种, 可同时进行陆-气间能量平衡和水量平衡的模拟, 弥补了传统水文模型对热量过程描述的不足. 该模型已作为大尺度水文模型分别用于美国的 Mississippi, Columbia, Arkansas-Red 等流域以及德国的 Delaware 等大尺度区域径流模拟^[12, 13]. 本研究欲以 VIC 模型为基础, 建立气候变化对中国径流影响评估模型.

1 VIC 模型简介

VIC 模型主要考虑了大气-植被-土壤之间的物交换过程, 反映土壤、植被、大气中水热状态变化和水热传输. VIC 模型中最初土壤分两层^[10], 后经改进分 3 层^[11], 在一个计算网格内分别考虑裸土及不同的植被覆盖类型. VIC 模型的主要特点有: (1) 同时考虑陆-气间水分收支和能量收支过程; (2) 同时考虑两种产流机制(蓄满产流和超渗产

2002-11-15 收稿, 2003-01-29 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划(G1998040905, 2001CB309404)、国家自然科学基金(批准号: 40275023, 40145020)及中科院百人计划项目“气候与植被的相互作用”联合资助.

E-mail: fgsu@mail.iap.ac.cn, zxie@lasg.iap.ac.cn

流)^[14]; (3) 考虑次网格内土壤不均匀性对产流的影响; (4) 考虑次网格内降水的空间不均匀性^[15]; (5) 考虑积雪融化及土壤冻融过程^[16].

VIC 模型中考虑了 3 类蒸发: 冠层湿部蒸发、叶丛蒸腾及裸土蒸发. 裸土蒸发分潜在蒸发 E_p (即充分供水时的蒸发) 和实际蒸发 E_g 两种. 模型中采用 Penman-Monteith 方程^[17] 来计算潜在蒸发. 当土壤处于非充分供水状态时, 土壤实际蒸发为 βE_p , 其中 β 为土壤湿度的函数, 反映土壤含水量与裸土蒸发之间的关系. 在对叶丛蒸腾的参数化中, 由气孔阻抗来反映辐射、土壤水、水汽压差、空气温度等因素的影响.

在 VIC 模型中用 Richards 方程来描述垂向一维土壤水运动, 土壤各层间的水汽通量服从 Darcy 定律. 在 VIC 模型中考虑了地表径流和基流两种径流成分的参数化过程. 对于地表径流的描述, 同时考虑了蓄满产流和超渗产流两种机制^[11], 并分别用土壤蓄水容量面积分配曲线和下渗能力面积分配曲线来表示土壤不均匀性对产流的影响. 蓄水容量曲线是基于新安江模型^[18] 中的产流思想, 在 VIC 模型中称之为可变的下渗能力曲线, 实际上仍然是蓄水容量的概念, 两条分布曲线分别采用 B 次方抛物线表示. VIC 模型中以第 1 层和第 2 层土壤作为产流

层, 蓄满产流发生在饱和土壤面积 A_s 上, 超渗产流发生在非饱和面积 $1 - A_s$ 上, 并且在该面积内重新分配. VIC 中对基流的描述采用的是 ARNO 模型^[19] 的方案, 模型中认为基流只发生在最下层土壤.

2 数据来源及模型参数

全国共分为 $60 \text{ km} \times 60 \text{ km}$ 网格 2604 个, 模型在每个网格上独立运行, 因此参数文件及数据文件需按网格来准备.

2.1 植被参数

在 VIC 模型中主要涉及两类参数, 一类是和植被有关的参数; 一类是和土壤有关的参数. 植被分类是根据 Maryland 大学发展的全球 1 km 土地覆盖数据^[19], 该数据中共分 11 种植被类型. 对于每一种植被类型需要标定的参数有: 结构阻抗、最小气孔阻抗、叶面指数、反照率、糙率、零平面位移及根区在每一层土壤所占的比例, 这些参数的确定主要根据 LDAS (land data assimilation system). LDAS 中植被参数的确定分别参考了 IGBP, BATS, NCAR LSM, SiB, SiB2 和 Mosaic 中的参数. 表 1 给出植被分类及在 VIC 模型中所采用的部分参数.

表 1 植被分类及参数

| 植被类型 | 反照率 | 最小气孔阻抗/($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$) | 叶面指数 | 糙率/m | 零平面位移/m |
|---------------------------------------|------|-------------------------------------------|-----------|--------|---------|
| 1 常绿针叶林 (evergreen needleleaf forest) | 0.12 | 250 | 3.40~4.40 | 1.4760 | 8.040 |
| 2 常绿阔叶林 (evergreen broadleaf forest) | 0.12 | 250 | 3.40~4.40 | 1.4760 | 8.040 |
| 3 落叶针叶林 (deciduous needleleaf forest) | 0.18 | 150 | 1.52~5.00 | 1.2300 | 6.700 |
| 4 落叶阔叶林 (deciduous broadleaf forest) | 0.18 | 150 | 1.52~5.00 | 1.2300 | 6.700 |
| 5 混交林 (mixed forest) | 0.18 | 200 | 1.52~5.00 | 1.2300 | 6.700 |
| 6 林地 (woodland) | 0.18 | 200 | 1.52~5.00 | 1.2300 | 6.700 |
| 7 林地草原 (wooded grasslands) | 0.19 | 125 | 2.20~3.85 | 0.4950 | 1.000 |
| 8 密灌丛 (closed shrublands) | 0.19 | 135 | 2.20~3.85 | 0.4950 | 1.000 |
| 9 灌丛 (open shrublands) | 0.19 | 135 | 2.20~3.85 | 0.4950 | 1.000 |
| 10 草原 (grasslands) | 0.20 | 120 | 2.20~3.85 | 0.0738 | 0.402 |
| 11 耕地 (crop land (corn)) | 0.10 | 120 | 0.02~5.00 | 0.0060 | 1.005 |

2.2 土壤参数

土壤质地分类是根据 NOAA 水文办公室提供的全球 5 min 的土壤数据, 并用 0~30 cm 的分类代表一个网格内的整个土层. 在土壤参数中一类是和土壤特性有关的参数, 在模式中标定后就不再改动, 如土壤饱和和体积含水量 (孔隙度) $\theta_s (\text{m}^3 \text{m}^{-3})$ 、饱和

土壤水势 $\psi_s (\text{m})$ 、土壤饱和水力传导度 $K_s (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 及用于描述非饱和流的指数参数 b , 这些参数的确定参考了 Hansen 等^[20]、Rawls 等^[21] 的工作. 在 VIC 模型中孔隙度是根据土壤总体密度 (bulk density) 计算得到. 表 2 给出土壤分类及在模型中所采用的部分参数.

表2 土壤分类及参数

| | 土壤质地 | $\theta_s / (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$ | ψ_s / m | $K_s / (\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$ | $2b + 3$ | 总体密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ |
|----|------------------------|-----------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------|----------|------------------------------------------|
| 1 | 沙土(sand) | 0.445 | 0.069 | 92.45 | 11.20 | 1490 |
| 2 | 壤质沙土(loamy sand) | 0.434 | 0.036 | 1218.24 | 10.98 | 1520 |
| 3 | 沙壤土(sandy loam) | 0.415 | 0.141 | 451.87 | 12.68 | 1570 |
| 4 | 粉质壤土(silt loam) | 0.471 | 0.759 | 242.78 | 10.58 | 1420 |
| 5 | 粉土(silt) | 0.523 | 0.759 | 242.78 | 9.10 | 1280 |
| 6 | 壤土(loam) | 0.445 | 0.355 | 292.03 | 13.60 | 1490 |
| 7 | 沙质粘壤土(sandy clay loam) | 0.404 | 0.135 | 384.48 | 20.32 | 1600 |
| 8 | 粉质粘壤土(silty clay loam) | 0.486 | 0.617 | 176.26 | 17.96 | 1380 |
| 9 | 粘壤土(clay loam) | 0.467 | 0.263 | 211.68 | 19.04 | 1430 |
| 10 | 沙质粘土(sandy clay) | 0.415 | 0.098 | 623.81 | 29.00 | 1570 |
| 11 | 粉质粘土(silty clay) | 0.497 | 0.324 | 115.78 | 22.52 | 1350 |
| 12 | 粘土(clay) | 0.482 | 0.468 | 84.15 | 27.56 | 1390 |

另一类土壤参数, 需要根据计算流量过程与实测流量过程的拟合程度进行调试最后确定, 如各土层深度(d_i)、蓄水容量曲线方次(B), 以及基流方案中的3个参数 D_m , D_s 和 W_s [10,14]. 这几个参数在模式中对产流的影响较大, $d_i \theta_s$ 即为各层土壤的蓄水容量, 其值影响产流的难易程度; b 直接控制产流量的大小, 计算与实测水量之间的平衡主要通过 B 调节. 在准备全国土壤参数文件时, 以上各参数初步定为: B 取0.3; 基流参数 D_m 、 D_s 和 W_s 分别为10、0.02和0.8; 上、下、深层土壤深度分别为0.1、0.5和2.0 m.

2.3 模型输入

VIC 模型可同时进行陆-气间能量平衡和水量平衡的模拟, 也可只进行水量平衡的计算, 在本研究中只进行水量平衡计算, 模型积分步长为日, 模拟蒸发、径流及土壤水. 所需要的模型输入是日降水(P)、日最高气温(T_{\max})及日最低气温(T_{\min}). 由于没有长系列的日辐射资料, 在模式中太阳辐射(S_0)是根据纬度和 Julian day 计算 [22]; 水汽压、向下的短波辐射、长波辐射是根据 T_{\max} 和 T_{\min} 计算 [23-26].

降水及气温资料采用了全国共740个站点包含1980~1990年的11年日资料. 站点信息需要插值到网格上, 插值方法有: 1) 按距离最小原则, 直接使用附近观测站的观测值作为网格内的平均值, 当网格单元趋近于0时, 其结果相当于 Thiessen 多边形方法; 2) 以距离为权重的三点插值法. 即首先选取距网格中心最近的3个站点, 然后以距离为权重进行内插; 当网格内的站点数超过3个时, 用网格内的所有站点进行以距离为权重的内插计算. 以上

插值方法都没有考虑地形对降水、气温空间分布的影响. 在以后进一步研究中, 将选取一种合适的方法来弥补这一缺陷, 比如考虑站点高程作为一种因子.

模型运行所需要的参数文件及模型输入准备好后, 气候变化对中国径流影响评估模型的框架就基本搭建起来了.

3 模型应用

首先使模型在全国连续运行, 定性分析计算水资源量在空间分布的合理性, 然后选取典型流域, 进行参数调试, 定量分析模型对径流的模拟能力.

3.1 中国区域径流量计算

在不做任何参数调试的情况下, VIC 模型在全国2604个网格上连续运行, 独立输出每个网格上1980~1990年的日径流深(mm)系列. 图1为根据插值结果统计的多年平均降水在全国的分布, 图2是多年平均计算径流深的分布. 图1和图2的图例描述右边括号中的数字代表取对应左边描述范围内物理值的网格数. 从图1和图2的对比来看, 网格多年平均计算径流深与降水在空间分布上对应关系良好, 其相关系数达0.9903, 水资源量基本呈现由东南向西北内陆减少的趋势. 由于缺乏描述水分收支的蒸发、土壤含水量、径流深等网格实测数据, 无法定量评估模型对区域水量平衡的模拟. 而流域出口断面的流量(m^3/s), 却是易获取的水文常规观测资料, 可通过对比流量过程来检验模型对径流的模拟能力. 这就需要汇流模型, 把网格上的计算径流深转化成流域出口断面的流量(m^3/s).

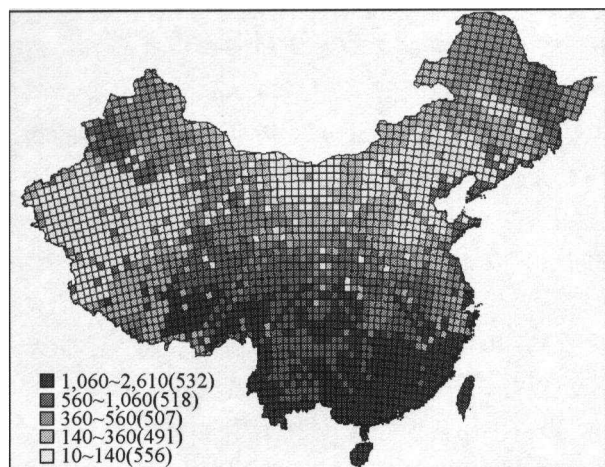


图1 1980~1990年全国多年平均降水分布图
(单位: mm)括号内数据为网格数

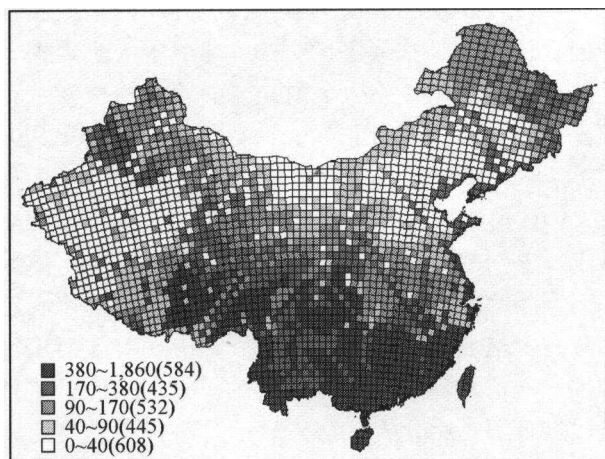


图2 1980~1990年全国多年平均径流深分布图
(单位: mm)

3.2 径流过程计算

本研究中分析了淮河流域蚌埠以上区域、渭河部分流域的径流过程, 汇流模型采用的是线性水库法计算坡面汇流, 马斯京根-康吉 (Muskingum-Cunge) 演算计算河道汇流^[27]。

淮河流域, 位于东经 110°55′~121°45′、北纬 30°55′~36°55′, 处于南北气候过渡带, 以北属暖温带区, 淮河以南属北亚热带区。从全流域 1953~1980 年的 240 多个站点 30 年的资料统计, 淮河流域多年平均降雨量为 600~1400 mm。降雨多集中在汛期, 6~8 月的降水量约占全年的 70% 左右; 在空间分布上, 南部大北部小, 山区大平原小, 沿海大内陆小。流域内 70% 的年径流量集中在汛期, 以暴雨形式产生。径流亦存在南部大北部小, 山区大

平原小, 沿海大内陆小的分布特征。将淮河流域蚌埠以上区域 $1.2 \times 10^5 \text{ km}^2$ 分为 9 个子区, 通过汇流分别进行模型计算和参数调试。

渭河位于黄河腹地大“几”字形基底部位, 较大支流多集中在北岸, 其中大于 10000 km^2 的大支流有 3 条, 即葫芦河、泾河、北洛河。研究区域多年平均降水为 400~600 mm, 属于半干旱区。

在本研究中仅对蓄水容量曲线方次 B 和 3 个基流参数 D_m 、 D_s 和 W_s 进行了调试, 土层深度保持不变。参数调试时, 主要采用下列两项目标函数:

(1) 反映总量精度的多年径流相对误差 E_r (%) :

$$E_r = (\bar{Q}_c - \bar{Q}_o) / \bar{Q}_o,$$

式中 \bar{Q}_o 和 \bar{Q}_c 分别为实测和模拟多年平均年径流量, 以深度单位 (mm) 表示。

(2) 反映流量过程吻合程度的模型效率系数 C_e :

$$C_e = \frac{\sum (Q_{i,o} - \bar{Q}_o)^2 - \sum (Q_{i,c} - Q_{i,o})^2}{\sum (Q_{i,o} - \bar{Q}_o)^2}.$$

式中 $Q_{i,o}$ 和 $Q_{i,c}$ 分别为实测和模拟的流量 (m^3/s)。

表 3 是淮河流域各子区的计算结果, 其中效率系数在 0.75 以上的有 5 个区, 0.7 以上的有 8 个区。图 3、图 4 分别为王家坝和蚌埠站的 1980~1990 年 11 年的模拟和实测月径流过程对比图, 月径流过程是由日过程累积得到。

表3 淮河流域各子区计算结果(1980~1990年)

| 控制站 | 经度 | 纬度 | 控制面积 /km ² | 实测径流 深/mm | 计算径流 深/mm | 效率 系数 |
|-----|--------|-------|--------------------------|--------------|--------------|----------|
| 息县 | 144.73 | 32.33 | 10190 | 407.33 | 406.88 | 0.7675 |
| 班台 | 115.07 | 32.72 | 11280 | 267.72 | 268.30 | 0.7915 |
| 漯河 | 114.03 | 33.58 | 12150 | 193.64 | 194.41 | 0.7574 |
| 周口 | 114.65 | 33.63 | 25800 | 241.96 | 251.91 | 0.7777 |
| 蒋家集 | 115.73 | 32.30 | 5930 | 361.30 | 359.84 | 0.7780 |
| 阜阳 | 115.83 | 32.90 | 35246 | 492.58 | 508.82 | 0.7143 |
| 王家坝 | 115.63 | 32.45 | 30630 | 1140.88 | 1149.53 | 0.7931 |
| 鲁台子 | 116.63 | 32.57 | 91620 | 1547.72 | 1648.30 | 0.7198 |
| 蚌埠 | 117.38 | 32.93 | 121330 | 1558.19 | 1602.07 | 0.6662 |

表 4 是渭河流域部分子区的计算结果, 图 5、图 6 分别是壮头和杨家坪实测和模拟的月径流过程对比图。由于杨家坪站只有 1980~1986 年的实测资料, 因此图 6 只提供了 7 年的结果。

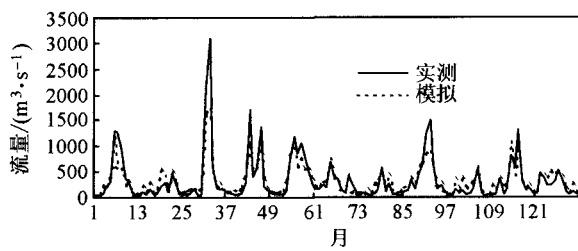


图3 1980~1990年王家坝站月径流过程模拟

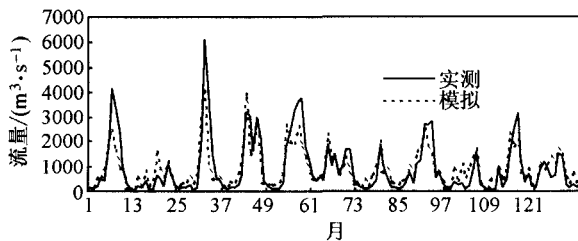


图4 1980~1990年蚌埠站月径流过程模拟

表4 渭河流域部分子区计算结果(1980~1990年)

| 控制站 | 经度 | 纬度 | 控制面积 /km ² | 实测径流 深/mm | 计算径流 深/mm | 效率 系数 |
|-----|--------|-------|--------------------------|--------------|--------------|----------|
| 交口河 | 109.35 | 35.65 | 17180 | 46.26 | 45.32 | 0.7290 |
| 壮头 | 109.83 | 35.03 | 25154 | 87.28 | 92.38 | 0.7255 |
| 杨家坪 | 107.88 | 35.33 | 14124 | 47.77 | 59.68 | 0.6431 |
| 南河川 | 105.75 | 34.62 | 13580 | 94.92 | 96.00 | 0.7255 |

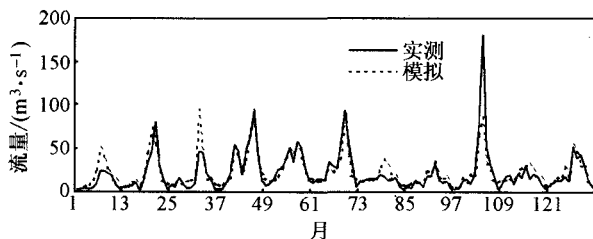


图5 1980~1990年壮头站月径流过程模拟

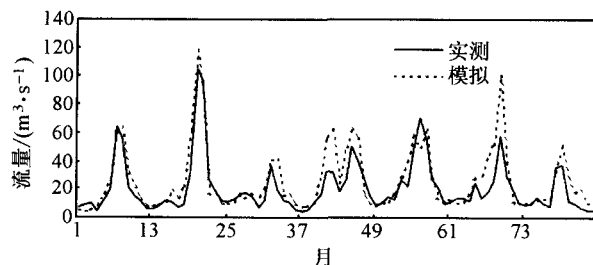


图6 1980~1986年杨家坪站月径流过程模拟

从计算结果来看,无论是地处湿润区的淮河流域还是处于半干旱区的渭河流域,所选控制站计算与实测月径流过程总体上一致,有些月份洪峰误差

较大,但仍然能够说明VIC模型具有一定的适应性,基本能够再现淮河流域和渭河流域的月径流过程.造成误差的原因可能是:(1)模型本身的不确定性.VIC模型比传统水文模型考虑了更多的物理过程,复杂模型由于参数化问题会带来更多的不确定性;(2)模型输入的代表性.由于覆盖淮河流域的站点只有29个,覆盖渭河研究区域的有8个站,模型输入代表性的不足将会直接影响径流的计算精度;(3)用于标定参数的实测流量系列,已非天然径流过程,其中包含了引水、灌溉、水库等人类活动的影响,而目前在VIC模型中没有考虑人类活动的影响,这也会导致模型误差.

4 结论与讨论

本研究以VIC模型为基础,构建了气候变化对中国径流影响评估模型的框架.建立了与土地覆盖类型及土壤质地有关的全国60 km网格植被参数库和土壤参数库,完成了740个站点包含1980~1990年11年日资料的强迫数据在全国60 km网格上的插值.VIC模型在全国2604个网格上连续运行,独立输出每个网格上1980~1990年的日径流深,结果显示网格多年平均计算径流深与多年平均降水在空间分布上呈现良好的对应关系.文中还对淮河流域蚌埠以上区域和渭河部分流域的模拟与实测月流量过程进行了对比分析,结果显示月过程峰形吻合较好.本研究初步表明了所建评估模型的合理性与可行性.

和目前大多数SVATS模型一样,VIC模型中亦有一些参数需要确定,如植被反照率、叶面指数、气孔阻抗、根带分布以及与土壤特性有关的参数等.这些参数有可能在小尺度准确获得,却很难用于全球尺度,点尺度或小尺度的参数是否可用于GCM网格是仍未解决的问题.VIC模型是用于水量平衡模拟时,需要通过实测资料来率定一些经验以及半经验的参数,如何确定计算网格上的参数是陆面参数化方案实现对大尺度区域水量平衡模拟必须解决的问题.

VIC模型与气候变化的情景连接运行是本研究的最终目的.有两种方式:(1)气候变化情景由气候模式预测的结果提供,作为VIC模型的输入,然后给出未来的水资源预测;(2)VIC模型作为气候模式的下边界,真正做到和气候模式耦合,同时给出降水、气温和径流的预测.在本研究中VIC模型

是作为大尺度水文模型来应用的,气候模型的连接仍只限于第一种方式,在后续的研究中真正实现水文模型与气候模式的耦合并用到业务中去是我们的努力方向.

致谢 感谢河海大学郝振纯教授、罗健老师在数据处理上提供的技术支持.感谢水利部水利信息中心章四龙、李岩为本研究提供了充分的水文资料.

参 考 文 献

- 1 Kite G W, et al. Atmospheric model data for macroscale hydrology. *J Hydrol*, 1999, 217: 303
- 2 Bergstrom S, et al. On the scale problem in hydrological modeling *J Hydrol*, 1998, 211: 253
- 3 Arnell N W. A simple water balance model for the simulation of streamflow over a large geophysical domain. *J Hydro*, 1999, 217: 314
- 4 王国庆, 等. 气候异常对黄河中游水资源影响评价网格化水文模型及应用. *水科学进展*, 2000, 11: 22(增刊)
- 5 熊立华, 等. 两参数月水量平衡模型的研制及其应用. *水科学进展*, 1996, 7: 80(增刊)
- 6 郝振纯, 等. 分布式月水文模型研究及其在淮河流域的应用. *水科学进展*, 2000, 11: 36(增刊)
- 7 Liston G E, et al. Evaluation GCM land surface hydrology parameterizations by computing river discharges using a runoff routing model: Application to the Mississippi basin. *J Appl Meteorol*, 1994, 33: 394
- 8 Schaake J C, et al. Simple water balance model for estimating runoff at different spatial and temporal scales. *J Geophys Res*, 1996, 101 (D3): 7461
- 9 Habets F, et al. The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area. Part I: Model and database. *J Hydro*, 1999, 217: 75
- 10 Liang X, et al. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *J Geophys Res*, 1994, 99(D3): 14415
- 11 Liang X, et al. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modification. *Global and Planetary Change*, 1996, 13: 195
- 12 Lohmann D, et al. Regional scale hydrology: I. Formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model. *Hydrol Sci J*, 1998, 43(1): 131
- 13 Nijssen B, et al. Streamflow simulation for continental-scale river basins. *Water Resour Res*, 1997, 33(4): 711
- 14 Liang X, et al. A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models. *Advances in Water Resources*, 2001, 24(9-10): 1173
- 15 Liang X, et al. One-dimensional statistical dynamic representation of subgrid spatial variability of precipitation in the Two-Layer Variable Infiltration Capacity Model. *J Geophys Res*, 1996, 101 (D16): 1403
- 16 Cherkauer K A, et al. Hydrologic effects of frozen soils in the upper Mississippi River basin. *J Geophys Res*, 1999, 104(D16): 19599
- 17 Shuttleworth W J. Evaporation. In: Maidment D R, ed. *Handbook of Hydrology*. New York: McGraw-Hill Inc, 1993. 4.1~4.53
- 18 Zhao R J. The Xinanjiang model applied in China. *J Hydrol*, 1992, 134: 371
- 19 Franchini M, et al. Comparative analysis of several conceptual rainfall runoff models. *J Hydrol*, 1991, 122: 161
- 20 Hansen M, et al. Global land cover classification at 1km resolution using a decision tree classifier. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21: 1331
- 21 Cosby B J, et al. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resour Res*, 1984, 20: 682
- 22 Rawls W J, et al. Infiltration and soil water movement. In: Maidment D R, ed. *Handbook of Hydrology*. New York: McGraw-Hill Inc, 1993. 5.1~5.51
- 23 Bristow K L, et al. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1984, 31: 159
- 24 Kimball J S, et al. An improved method for estimating surface humidity from daily minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 85: 87
- 25 Thornton P E, et al. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity and precipitation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 93: 211
- 26 Peter E, et al. Simultaneous estimation of daily solar radiation and humidity from observed temperature and precipitation: an application over complex terrain in Austria. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 104: 255
- 27 赵人俊. 流域水文模拟. 北京: 水利电力出版社, 1984