

# 森林对流域蒸发和径流影响的动态模拟

邓慧平

(聊城大学 环境与规划学院, 山东 聊城 252059)

**摘要:** 为了揭示森林植被对流域蒸发和径流的影响,用耦合模型 SSiB4T/TRIFFID 对长江两条支流蒸发和径流对植被覆盖动态变化的响应过程进行了模拟,分析了森林植被影响蒸发和径流的机制。在植被动态演替过程中,上游的梭磨河流域森林主要通过改变土壤蒸发和冠层截留蒸发影响蒸发和径流,其水文效应与冠层截留能力和土壤蒸发能力有关;下游的青弋江流域森林主要通过自身较强的蒸腾作用明显增加蒸发和减小径流。

**关键词:** 耦合模型; 动态模拟; 森林植被水文影响; 长江流域

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)04-0061-04

## Dynamic simulation of the effects of forest vegetation on evaporation and runoff in river Basin

DENG Huiping

(School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

**Abstract:** In order to reveal the impacts of forests on evaporation and runoff in river basin, the coupled model SSiB4T/TRIFFID was employed to conduct numerical simulations for responses of evaporation and runoff on the dynamic changes of vegetation cover over two tributaries of the Yangtze River. The mechanism of forests effecting evaporation and runoff was analyzed. The results showed that in the process of long-term vegetation succession, the forests in the Suomo River Basin located in the upper reaches influence the evaporation and runoff mainly through changing the soil evaporation and canopy interception. The hydrological effects are related to the ability of canopy interception and soil evaporation. The forests in Qingyijiang River Basin located in the down reaches increase evaporation and reduce runoff significantly through their relatively strong transpiration.

**Key words:** coupled model; dynamic modeling; hydrological effects of forest vegetation; Yangtzi River Basin

## 1 概述

流域植被覆盖变化通过改变冠层截留蒸发、植被蒸腾和土壤蒸发影响流域水量平衡。迄今为止,已开展了大量流域森林植被水文影响的研究,主要结论有森林减小径流量、增加径流量和对径流量没有明显影响,这方面的工作有关文献作了详细的总结<sup>[1-2]</sup>。1998年长江流域特大洪水发生后,森林植被水文影响问题受到广泛关注,许多专家学者认为大江大河源头及上游森林植被的破坏是造成水灾的根本原因,国家也实施了退耕还林还草的措施并投入大量资金进行长江上游流域生态恢复。深入认识森林植被对流域水文的影响及影响机理可为流域水

资源管理和生态建设以及国家制定有关决策提供科学依据。由于难以在流域尺度上进行森林植被水文影响的控制试验,森林集水区比较方法在分析森林水文影响方面有其局限性<sup>[3]</sup>。传统的流域水文模型侧重河川径流的模拟,也难以揭示森林植被变化对水文的影响,因此需要将地表能量交换过程、土壤水分运动过程、植物蒸腾与光合过程、植被动态变化和流域水文过程这些影响森林植被水文效应的基本过程相集成的耦合模型<sup>[4]</sup>。

长江上游的梭磨河流域海拔在 2 180 ~ 5 301 m 之间,多年平均气温 8.6℃,属大陆性高原寒温带季风气候<sup>[3-4]</sup>。下游青弋江流域地处亚热带湿润季风气候区,气候温暖,雨量丰沛<sup>[5]</sup>。两个流域的植被

收稿日期: 2012-01-17; 修回日期: 2012-03-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41075060)

作者简介: 邓慧平(1962-),男,江苏人,博士,主要从事陆面模式研究。

在长期适应当地气候的过程中形成了各自的植物-水分关系,进而对流域的水量平衡产生不同的影响。本文用耦合模型 SSiB4T/TRIFFID<sup>[4-5]</sup> 对梭磨河和青弋江流域植被长期演替下的径流和蒸发的动态变化过程进行模拟,分析森林植被对流域径流和蒸发的影响及影响机制。

2 所用资料与有关参数

模型需要的强迫因子梭磨河流域采用美国国家大气研究中心 1983-1987 年时间步长为 3 h 的再分析资料<sup>[4]</sup>,对于降水,除再分析降水资料外,将流域内马尔康气象站 1983-1987 年逐日降水量除以 8 平均分配到每个计算步长,用于数值模拟。青弋江流域强迫因子采用流域内 4 个气象站 2007-2009 年时间步长为 1 h 的实测资料<sup>[5]</sup>。计算饱和区占流域面积比例系数  $F_{sat}$  公式中的系数  $F_{max}$  和  $C_s$ <sup>[6]</sup>,梭磨河流域分别为 0.40 和 0.45<sup>[4]</sup>,青弋江流域分别为 0.40 和 0.35<sup>[5]</sup>。对于所有模拟试验,3 层土壤厚度分别取值 0.02 m(表层)、1.00 m(根系层)和 2.00 m(深层),土壤在可见光、近红外和热红外波段的反射率分别取值 0.225、0.275 和 0.00,土壤其它参数梭磨河流域取 SSiB 给出的植被类型 3(针阔叶林)、青弋江流域取植被类型 2(落叶阔叶林)的参数。植被落叶的临界温度和临界水分影响因子分别取值 273K 和 0.2。土壤表层垂向饱和和导水率及饱和导水率随土壤深度的衰减系数  $f$  两个流域均分别取值  $2.2 \times 10^{-3} \text{ m/s}^{[7]}$  和 2<sup>[6]</sup>。饱和导水率非各向同性因子  $\alpha$ <sup>[6]</sup>,青弋江和梭磨河流域分别取值 125<sup>[5]</sup> 和 75<sup>[8]</sup>。模型中与计算土壤表面蒸发阻抗有关的经验系数 RSOIL 除取 SSiB 原值 101840 进行模拟外,在分析土壤蒸发大小对森林水文效应的影响时,RSOIL 取值 251840 以减小土壤蒸发。模型中其它参数保留 SSiB4 和 TRIFFID 中原来的参数值。

3 结果与分析

3.1 梭磨河流域不同植被覆盖对蒸发和径流的影响

梭磨河流域模型中 6 种植被类型为针阔叶林、常绿针叶林、C3 草、C4 草、灌木和高纬灌木<sup>[4]</sup>。选择流域分别以针阔叶林、常绿针叶林、C3 草和高纬灌木四种植被为主的覆盖情景(针阔叶林、常绿针叶林、C3 和高纬灌木初始覆盖率取值 0.80,同时其它植被类型初始覆盖率取值 0.01)进行不同植被覆盖水文影响的数值试验(马尔康站实测降水)。每

个数值试验将 5 年的强迫资料重复运行 10 年,取后 5 年模拟结果进行分析。表 1 是单位叶面积指数截留能力 SATCAP 分别取值 0.1、0.2 mm,RSOIL 分别取值 251 840 和 101 840 四种不同组合在以上植被覆盖情景下模拟的 5 年平均潜热  $\lambda E$  及其三个分量:蒸腾  $\lambda E_{et}$ 、冠层截留蒸发  $\lambda E_{ci}$  和土壤蒸发  $\lambda E_{gs}$ 。在蒸发的三个分量中,冠层截留蒸发针阔叶林与针叶林差异很小且明显高于草和高纬灌木覆盖。

| 表 1 模拟的 5 年平均逐日流域潜热 |             |                  |                  | W/m <sup>2</sup> |
|---------------------|-------------|------------------|------------------|------------------|
|                     | $\lambda E$ | $\lambda E_{et}$ | $\lambda E_{ci}$ | $\lambda E_{gs}$ |
| RSOIL = 101840      |             |                  |                  |                  |
| SATCAP = 0.1 mm     |             |                  |                  |                  |
| 针阔叶林覆盖              | 42.2        | 8.1              | 16.2             | 17.9             |
| 针叶林覆盖               | 35.4        | 5.9              | 15.7             | 13.8             |
| C3 草覆盖              | 38.2        | 3.8              | 7.5              | 26.8             |
| 高纬灌木覆盖              | 41.9        | 5.1              | 8.3              | 28.4             |
| SATCAP = 0.2 mm     |             |                  |                  |                  |
| 针阔叶林覆盖              | 48.7        | 8.6              | 22.2             | 17.9             |
| 针叶林覆盖               | 42.2        | 6.1              | 22.2             | 14.0             |
| C3 草覆盖              | 43.0        | 4.1              | 11.7             | 27.7             |
| 高纬灌木覆盖              | 47.1        | 5.5              | 13.0             | 28.5             |
| RSOIL = 251840      |             |                  |                  |                  |
| SATCAP = 0.1 mm     |             |                  |                  |                  |
| 针阔叶林覆盖              | 35.9        | 8.1              | 16.4             | 11.4             |
| 针叶林覆盖               | 30.8        | 6.1              | 15.8             | 8.9              |
| C3 草覆盖              | 28.5        | 4.4              | 7.8              | 16.4             |
| 高纬灌木覆盖              | 31.2        | 5.5              | 8.5              | 17.2             |
| SATCAP = 0.2 mm     |             |                  |                  |                  |
| 针阔叶林覆盖              | 42.4        | 8.7              | 22.2             | 11.5             |
| 针叶林覆盖               | 37.5        | 6.3              | 22.2             | 8.9              |
| C3 草覆盖              | 33.3        | 4.7              | 12.0             | 16.4             |
| 高纬灌木覆盖              | 36.4        | 6.0              | 13.2             | 17.2             |

土壤蒸发 C3 草和高纬灌木覆盖最大,针叶林覆盖最小。蒸腾针阔叶林覆盖最大,针叶林与灌木次之,C3 草覆盖最小,但不同植被之间差异不大,森林覆盖蒸腾潜热仅比草和高纬灌木覆盖大 3~4 W/m<sup>2</sup>(针阔叶林)和 1~2 W/m<sup>2</sup>(针叶林)。RSOIL 取值 101 840,草和高纬灌木覆盖具有较高的土壤蒸发,导致针阔叶林覆盖总蒸发潜热与高纬灌木覆盖基本相当,草和高纬灌木覆盖总蒸发潜热高于针叶林覆盖。RSOIL 取值 25 1840,草和高纬灌木覆盖土壤蒸发明显减小,导致针阔叶林覆盖总蒸发潜热高于高纬灌木覆盖,针叶林覆盖总蒸发潜热高于 C3 草甚至高于高纬灌木覆盖(SATCAP = 0.2 mm)。

3.2 梭磨河流域蒸发和径流对植被演替的响应

6 种植被类型初始覆盖率取值 0.01,RSOIL 取

值 101 840, SATCAP 取值 0.1 mm, 将梭磨河流域 5 年强迫资料(马尔康站实测降水)重复运行 120 次连续模拟 600 年, 图 1 (a) 是植被覆盖率的变化。将模拟的潜热等按 5 个模拟年进行平均, 图 1(b) 是 SATCAP 取值 0.1 mm 模拟的潜热及其三个分量的变化, 图 1(c) 是相应的流域蒸发和径流深的变化, 图 1(d) 是保持其它条件相同, SATCAP 取值 0.2 mm 模拟的潜热及其三个分量的变化。两个试验第 51~55 模拟年流域蒸发潜热达到最大(流域高纬灌木覆盖达 78%)。表 2 给出了两个试验第 51~55 模拟年以及最后 5 个模拟年平均流域蒸发潜热及其三个分量。SATCAP 取值 0.1 mm, 最后 5 个模拟年平均潜热比第 51~55 模拟年低  $5.3 \text{ W/m}^2$ , 与高纬灌木覆盖相比, 森林全年增加径流深 66 mm; SAT-

CAP 取值 0.2 mm, 最后 5 个模拟年平均潜热已高于裸土蒸发潜热, 但与高纬灌木覆盖相比, 森林全年还可增加径流深 36 mm。在相同条件下再分析降水资料模拟结果<sup>[4]</sup>: SATCAP 取值 0.1 和 0.2 mm, 森林全年分别增加径流深 80 和 31 mm。两种降水模拟结果虽有差异, 但基本结论是一致的。梭磨河流域森林水文效应对冠层截留能力变化敏感<sup>[4]</sup>, 下面分析其对土壤蒸发变化的敏感性。将 RSOIL 由 101 840 增加到 251 840, 其它条件保持相同, 图 2 (a) 是 SATCAP 取值 0.1 mm 模拟的潜热及其三个分量变化, 图 2 (b) 是相应的流域蒸发和径流深的变化, 图 2 (c) 是 SATCAP 取值 0.2 mm 模拟的潜热及其三个分量的变化。

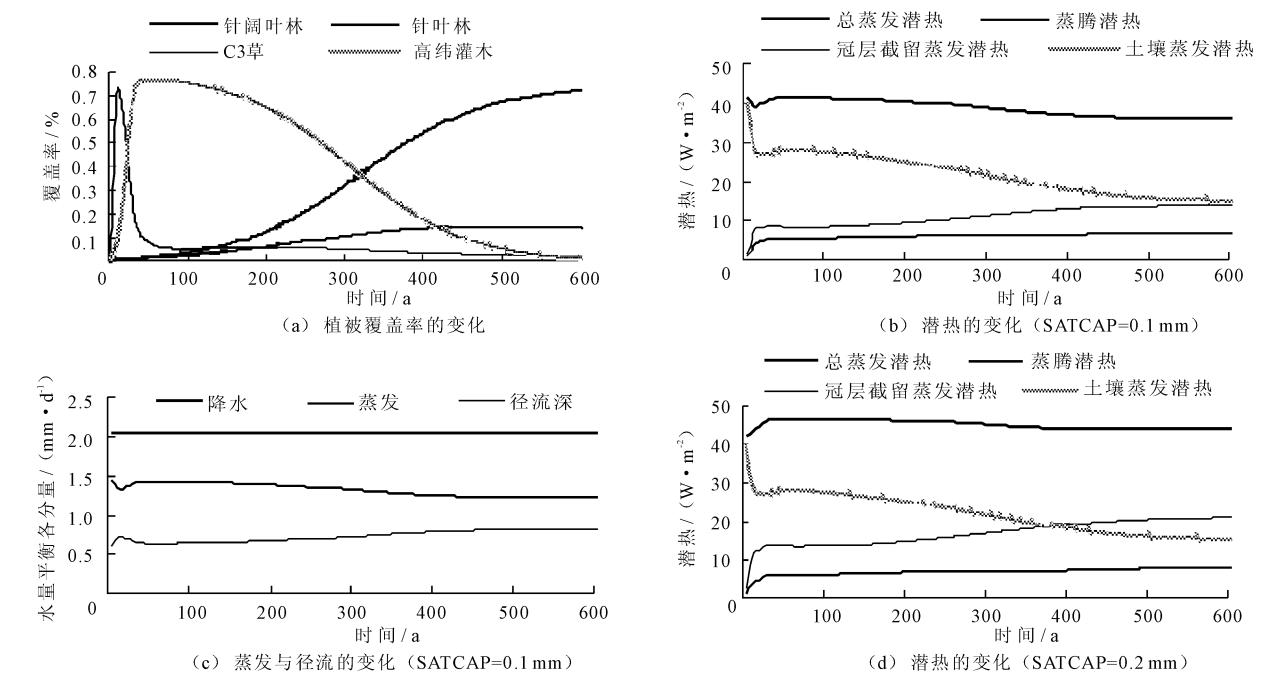


图 1 植被覆盖率、潜热及水量平衡的变化图

| 表 2 模拟的 5 年平均逐日流域地表能量平衡 $\text{W/m}^2$ | $\lambda E$ | $\lambda E_{ct}$ | $\lambda E_{ci}$ | $\lambda E_{gs}$ |
|----------------------------------------|-------------|------------------|------------------|------------------|
| SATCAP = 0.1 mm                        |             |                  |                  |                  |
| 51~55 模拟年                              | 41.6        | 5.3              | 8.5              | 27.8             |
| 最后 5 个模拟年                              | 36.3        | 6.8              | 14.3             | 15.2             |
| 两个时期潜热变化                               | -5.3        | 1.5              | 5.8              | -12.6            |
| SATCAP = 0.2 mm                        |             |                  |                  |                  |
| 51~55 模拟年                              | 47.0        | 5.8              | 13.3             | 27.9             |
| 最后 5 个模拟年                              | 44.1        | 7.7              | 21.0             | 15.4             |
| 两个时期潜热变化                               | -2.9        | 1.9              | 7.7              | 12.5             |

由于裸土以及草和灌木覆盖的土壤蒸发明显减小(表 1), 减小了森林增加径流的作用, 当 SATCAP 分别取值 0.1 和 0.2 mm 时, 最后 5 个模拟年平均潜

热分别为  $31.2$  和  $38.8 \text{ W/m}^2$ , 不仅高于裸土而且比高纬灌木覆盖时达到的最高潜热分别增加  $0.0$  和  $2.1 \text{ W/m}^2$ , 相比之下, 全年减小径流深  $0 \sim 26 \text{ mm}$ 。用再分析降水资料模拟, SATCAP 取值 0.1 mm, 森林全年增加径流深 16 mm; SATCAP 取值 0.2 mm, 全年减小径流深 12 mm。由于梭磨河流域不同植被之间蒸腾差异小, 森林主要通过改变冠层截留和土壤蒸发影响流域蒸发和径流, 森林水文效应除与冠层截留能力有关还与土壤蒸发大小有关, 对于较低的土壤蒸发, 森林对径流的影响已不明显。

3.3 青弋江流域蒸发和径流对植被演替的响应

青弋江流域模型中 6 种植被类型为落叶阔叶林、常绿针叶林、C3 草、C4 草、灌木和高纬灌木。将

青弋江流域 3 年强迫资料重复运行 200 次连续模拟 600 年(各植被类型初始覆盖率取值 0.01, SATCAP 取值 0.1 mm, RSOIL 取值 251 840),图 3(a)是植被覆盖率的变化。将模拟的潜热等按 3 个模拟年进行平均,图 3(b)是模拟的潜热及其三个分量的变化,图 3(c)是相应的流域蒸发和径流深的变化,图 3(d)是保持其它条件相同而 RSOIL 取值 101 840 模拟的潜热及其三个分量的变化。对于青弋江流域,植被蒸腾阔叶林最大,针阔混交林次之、常绿针叶

林又次之,C3 草和灌木蒸腾最小,与上游梭磨河流域比较,植被蒸腾明显增加而且森林与 C3 草和灌木之间蒸腾差异明显,针叶林和阔叶林覆盖蒸腾潜热分别比草和灌木覆盖高 10~22 W/m<sup>2</sup> [5]。与梭磨河流域完全不同,在植被从 C3 草到灌木到阔叶林的演替过程中,植被蒸腾变化主导了流域蒸发和径流的变化,流域蒸发明显增加而径流明显减小,阔叶林取代草和灌木全年径流深减小 153 mm(图 3(c)),且对 RSOIL 取值变化并不很敏感(图 3(d))。

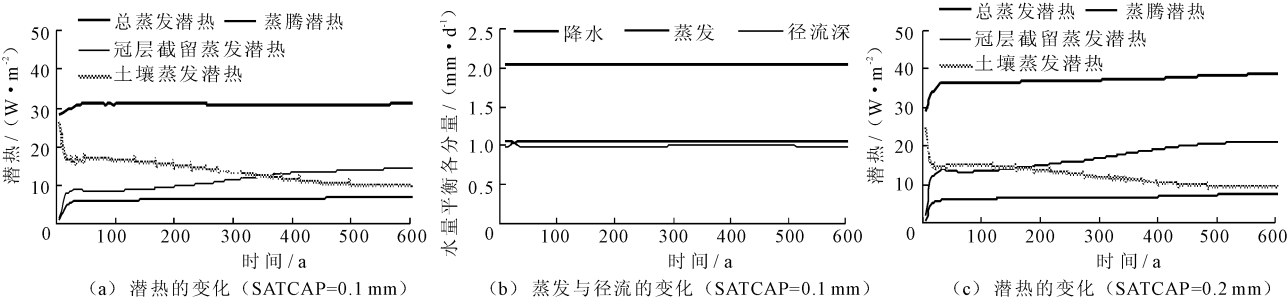


图 2 潜热与水量平衡变化

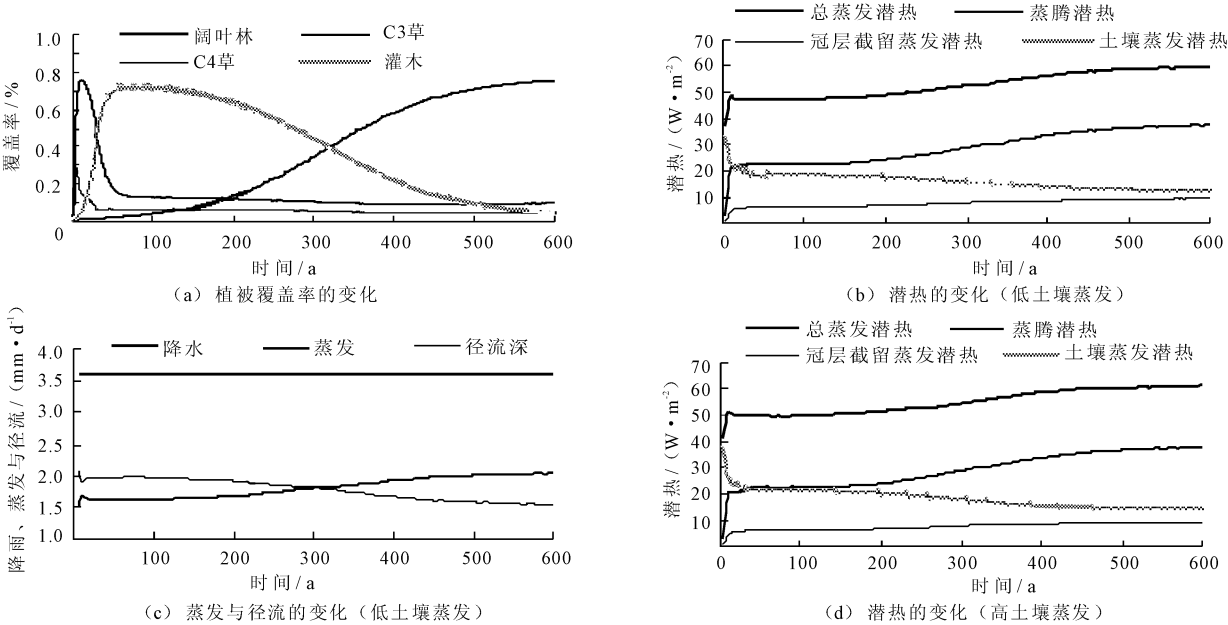


图 3 植被覆盖率、潜热及水量平衡的变化图

4 结论与讨论

本文用耦合模型 SSiB4T/TRIFFID 对长江上游的梭磨河流域和下游的青弋江流域进行森林植被覆盖变化径流和蒸发影响的模拟,探讨了森林植被水文影响及影响机理。主要结论有:

(1)上游的梭磨河流域植被蒸腾较弱,森林覆盖蒸腾潜热仅比草和灌木覆盖高 1~4 W/m<sup>2</sup>,森林覆盖蒸发以冠层截留蒸发和土壤蒸发为主,草和灌木覆盖蒸发以土壤蒸发最大,冠层截留蒸发次之;在

四种植被类型中针阔叶林覆盖蒸发最大并高于裸土蒸发,在高土壤蒸发和较低的冠层截留条件下针叶林覆盖蒸发最小并低于裸土蒸发。

(2)在植被动态演替过程中,上游梭磨河流域森林主要通过改变土壤蒸发和冠层截留蒸发影响流域的蒸发和径流,其水文效应与冠层截留能力和土壤蒸发能力有关,对于较低的土壤蒸发,森林对径流的作用已不明显;下游的青弋江流域植被蒸腾明显增强且森林与草和灌木之间蒸腾差异明显,森林主

(下转第 68 页)

续表 1

| 角度     | 流量<br>$q$ | 新公式<br>跃长计<br>算值 | 跃长<br>实测<br>值 | 公式<br>跃后<br>水深 | 跃后<br>实测<br>水深 | 跃长<br>误差 | 跃后<br>水深<br>误差 |
|--------|-----------|------------------|---------------|----------------|----------------|----------|----------------|
| 11.54° | 0.034     | 0.362            | 0.329         | 0.094          | 0.086          | -10.04   | -9.28          |
|        | 0.035     | 0.366            | 0.361         | 0.096          | 0.089          | -1.36    | -7.26          |
|        | 0.04      | 0.384            | 0.358         | 0.102          | 0.096          | -7.32    | -5.79          |
|        | 0.043     | 0.391            | 0.354         | 0.107          | 0.097          | -10.39   | -9.67          |
| 14.48° | 0.036     | 0.381            | 0.388         | 0.097          | 0.093          | 1.76     | -4.46          |
|        | 0.039     | 0.377            | 0.365         | 0.098          | 0.097          | -3.36    | -2.04          |
|        | 0.041     | 0.376            | 0.401         | 0.101          | 0.101          | 6.24     | -0.17          |
|        | 0.042     | 0.381            | 0.405         | 0.102          | 0.098          | 5.92     | -4.12          |
| 17.46° | 0.033     | 0.405            | 0.385         | 0.094          | 0.092          | -5.20    | -2.09          |
|        | 0.036     | 0.388            | 0.400         | 0.098          | 0.098          | 2.92     | 0.26           |
|        | 0.039     | 0.384            | 0.387         | 0.099          | 0.098          | 0.80     | -0.79          |
|        | 0.044     | 0.413            | 0.397         | 0.108          | 0.106          | -4.00    | -2.14          |

5 结 语

利用量纲分析对影响 c 型折坡水跃长度的因素进行了推导,并结合模型试验推导出坡角 5.74°~17.46° 间水跃的共轭水深比  $\eta$ 、水跃长度  $L_j$  计算公式(8)、(11),并利用水槽试验数据和实际工程水工模型试验对其公式进行了验证。验证结果表明公式(8)和公式(11)的计算误差不超过  $\pm 12\%$ ,可供计算参考。

(上接第 64 页)

要通过自身较强的蒸腾作用影响蒸发和径流,随着阔叶林逐步取代草和灌木,流域蒸发明显增加而径流明显减小。

流域植被从草到灌木最后到森林的演替过程中,蒸腾和冠层截留蒸发增加而土壤蒸发减小。对于长江流域,在海拔高气温低的地区,由于森林蒸腾与草和灌木差异小,当蒸腾和冠层截留蒸发增加之和小于土壤蒸发的减小量,森林增加了径流量。但随着地势下降气温增加,森林增加蒸发的作用增强(蒸腾增加),当蒸腾和冠层截留蒸发增加之和与土壤蒸发的减小量相当,森林对径流量没有明显影响。随着地势进一步下降和气温进一步增加,森林与草和灌木蒸腾差异进一步增大,蒸腾和冠层截留蒸发两者增加之和大于土壤蒸发的减小量,森林减小了径流量。气候是决定森林水文效应最重要的因素,在相同的气候条件下,森林类型是影响森林水文效应的重要因素。对于上游梭磨河流域,影响土壤蒸发的因数如土壤质地、导水能力和土壤反射率等均可能通过影响土壤蒸发影响森林水文效应。

参考文献:

[1] Leutheusser H J, Schiller E J. Hydraulic jump in a rough channel[J]. Water Power & Dam Construction, 1975, (5):25-34.

[2] Rajaratnam N. Hydraulic jumps on rough beds[J]. Trans. Eng. Inst. Canada,1968,11 (A-2):1-8.

[3] Ead S A, Rajaratnam N, Katopodis C. Turbulent open-channel flow in circular corrugated culverts[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2000,126(10):750-757.

[4] 邱秀云. 水力学[M]. 乌鲁木齐:新疆电子出版社,2008:50.

[5] SL253-2000,水闸设计规范[S]. 北京:水利电力出版社,2000.

[6] SL253-2000,溢洪道设计规范[S]. 北京:水利电力出版社,2000.

[7] 新疆库马拉克河小石峡水电站工程水工模型试验研究报告[R]. 新疆农业大学水工实验室,2010:6.

[8] 石教豪,王罗斌,李莉. 亭子口水利枢纽工程泄洪消能试验研究[C]//. 水力学与水利信息学进展,2009:311-318.

[9] 汉江旬阳水电站泄洪闸、冲砂闸水工模型试验报告[R]. 西安理工大学水力学研究所,2007.

[10] 张英克,王继保,陈和春. 芙蓉江鱼塘水电站泄洪消能方案试验研究[J]. 三峡大学学报,2005,2(1):20-23.

参考文献:

[1] 黄秉维. 确切地估计森林的作用[J]. 地理知识,1981(1):1-3.

[2] 李文华,何永涛,杨丽韞. 森林对径流影响研究的回顾与展望[J]. 自然资源学报,2001,16(5):398-406.

[3] 邓慧平,李秀彬,陈军锋,等. 流域土地覆被变化水文效应的模拟[J]. 地理学报,2003,58(1):53-62.

[4] 邓慧平. 流域植被水文效应的动态模拟[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(12): 1404-1409.

[5] 邓慧平,刘惠民,肖燕. 流域植被与土壤导水系数对青弋江流域水文影响的数值试验[J]. 水资源与水工程学报, 2012,23(3):4-9.

[6] Niu G Y, Yang, Z L. A simple TOPMODE-based runoff parameterization (SIMTOP) for use in global climate models[J]. J Geophys Res, 2005,110:1-15.

[7] Beven K J. On subsurface stormflow: An analysis of response times[J]. Hydrological Science Journal, 1982, 27: 505-521.

[8] 邓慧平,孙菽芬. 地形指数模型 TOPMODEL 与陆面模式 SSiB 的耦合及在流域尺度上的数值模拟[J]. 中国科学地球科学(中国科学 D 辑),2012,42(7):1083-1093.