

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.01.005

基于能量平衡法的融雪模型多时间尺度模拟

冯 曦^{1,2},王船海^{1,2},李书建³,程华娟⁴,吴晓玲^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;
3. 江苏省水文水资源勘测局常州分局,江苏 常州 213001; 4. 江苏省水文水资源勘测局泰州分局,江苏 泰州 225300)

摘要: 选择基于能量平衡法的融雪模型,对不同时间尺度的融雪模型进行比较。尝试采用小时模型进行日温模拟,分别用线性模型和正弦-指数模型模拟温度的变化。选择三江源区 18 个气象站中测得积雪最多的清水河气象站、甘德气象站、达日气象站的实测资料对模型模拟结果进行验证,结果表明:基于小时尺度的融雪模型比日模型的模拟精度高;线性模型对资料要求不高,并且能更好地模拟积雪消融的过程。

关键词: 能量平衡;时间尺度;日温模拟;融雪模型;三江源区;模型验证

中图分类号:TV211.1⁺3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2013)01-0026-06

Multi-time scale simulations with snow melting models based on energy balance theory

FENG Xi^{1,2}, WANG Chuanhai^{1,2}, LI Shujian³, CHENG Huajuan⁴, WU Xiaoling^{1,2}

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Changzhou Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Changzhou 213001, China;

4. Taizhou Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Taizhou 225300, China)

Abstract: Multi-time scale snow melting models were compared based on the energy balance theory. The linear model and the sine-exponential model were used to simulate temperature changes on an hourly scale. Observed data from the Qingshuihe, Gande, and Dari meteorological stations, where the snow depths were higher than those of the others among 18 meteorological stations in the three-river source area, were used to verify the simulated results. The results show that the hourly-scale snow melting model has higher precision than the daily-scale model, and the linear model, which needs less data, can better simulate the snow melting process.

Key words: energy balance; time scale; daily temperature simulation; snow melting model; three-river source area; model verification

在我国西北干旱地区,积雪水资源是河川径流的主要补给来源^[1]。目前,对融雪水文模型时间尺度的研究大多是以年、月、日为间隔的尺度,而以小时为时间尺度的融雪模型则比较少。基于融雪模型以小时为时间尺度的研究对于提高融雪模型的精度,以及在不同气候类型下对积、融雪进行模拟等具有重要的研究意义。另外,在这方面展开研究,有利于深入认识如何在不同的时间尺度上来建立与之相适应的水文模型,有利于分析同一水文模型在不同时间尺度上参数之间的相互转换规律^[2]。

收稿日期: 2012-03-01

基金项目: 水利部行业公益性项目(201101024, 201101224); 国家自然科学基金青年基金(51009045); 教育部博士点基金(20110094120019)

作者简介: 冯曦(1986—),男,江苏南通人,硕士研究生,主要从事水文预报及河网水动力学研究。E-mail:sasukevon@sina

融雪模型一般分为 2 类:基于能量平衡的模型^[3-4]和基于气温指标的模型(也称度-日模型)。随着水文观测仪器以及融雪理论的发展,基于能量平衡的融雪模型成为研究高纬度地区积、融雪的新方向。

国内应用最多的是基于气温指标的融雪型新安江模型。杨秀松等^[5]、穆振侠等^[6]、俞鑫颖等^[7]运用新安江模型对新疆部分河流的径流过程进行了模拟。许慧萍^[8]则在水箱模型中考虑了冻土和积雪对径流的影响,融雪量和冻土冻融计算均采用度日因子法,模拟了黄河源区的径流过程。王红娟^[9]应用 PRMS 模型模拟了乌鲁木齐河流域的日径流过程。黄粤等^[10]将 MIKE SHE 模型应用于开都河流域,较好地模拟了该流域的产流过程、融雪过程及蒸散过程。

当然,还有很多著名模型被应用于我国的寒区,不过因为我国目前冻土期融雪、径流、蒸发与土壤水分运移变化的长期观测资料严重缺乏或模型的适用性等其他原因,模型的应用受到极大的限制,没有某个模型被大规模使用。

笔者基于水量平衡和能量平衡原理,构建高纬度地区融雪模型,并分别采用小时步长和日步长对单点的积雪深度进行模拟。这有助于理解季节性积融雪的物理变化过程,并为高纬度地区水文模型的研究提供经验。

1 模型计算原理

1.1 能量平衡方程

能量平衡贯穿于积雪冻融的整个过程。根据能量平衡原理,在有限时间内积雪表层与大气的热量交换过程可以表示为

$$Q_{\text{net}} = (Q_{\text{R}} + Q_{\text{p}} + Q_{\text{h}} - Q_{\text{le}} + Q_{\text{g}}) \Delta t \tag{1}$$

式中: Q_{net} ——模拟时段内的净能量, J; Q_{R} ——净辐射通量, W/m^2 ; Q_{p} ——融雪期降水所带来的热通量, W/m^2 ; Q_{h} ——感热通量, W/m^2 ; Q_{le} ——潜热通量, W/m^2 ; Q_{g} ——地热通量, W/m^2 。各通量的计算过程见文献[11-14]。

1.2 水量平衡方程

水文循环的基础就是水量平衡。根据水量平衡原理可得

$$\Delta W = (P - E - M) \Delta t \tag{2}$$

式中: ΔW ——雪水当量变化量, mm; P ——时段内的降水量, mm; E ——雪升华和蒸发量, mm; M ——雪层液态水出水量, mm。

2 模型计算过程

通过参数计算可以求出 Q_{net} , 在本研究中, 为了简化复杂的积雪层冻融过程, 将输入到积雪层的总能量看作 2 个部分的叠加:一部分能量(ΔU)用于改变积雪层的内能, 表现为积雪层温度的升高或降低;另一部分能量(Q_{m})则被用于积雪层冻融过程中的能量交换, 即在积雪的融化和冻结中被吸收、释放的能量。

当积雪层融解的时候, 基于雪的物理性质, 其具有一定的持水能力。只有当液态水超过积雪液态水持水能力时才能从积雪中流出。在此, 简单地将积雪液态水持水能力考虑成与积雪量的线性函数, 比例系数 θ 取 0.03, 通过计算可得融雪出流量:

$$W_{\text{liq}, \max} = \theta W_{\text{ice}} \tag{3}$$

$$W_{\text{out}} = W_{\text{liq}, t+1} - W_{\text{liq}, \max} \quad W_{\text{liq}, t+1} \geq W_{\text{liq}, \max} \tag{4}$$

式中: $W_{\text{liq}, \max}$ ——积雪液态水持水能力, m; W_{ice} ——积雪量, m; W_{out} ——液态水出流量, m; $W_{\text{liq}, t+1}$ ——液态水总量, m。

3 基于小时尺度的模型转换

现有资料包括日降水量、日平均风速、日平均气温、日最高气温、日最低气温、日平均相对湿度、日照时数。这些资料可以满足时间尺度为日的融雪模型的资料要求。但对应于时间尺度为小时的融雪模型, 则需对现有的数据进行如下转换处理。

3.1 降水量

降水包括降雨和降雪, 笔者根据临界温度区分降雨与降雪。用公式表示为

$$P_r = \begin{cases} p & T_a > T_1 \\ p(T_a - T_2)(T_1 - T_2) & T_2 \leq T_a \leq T_1 \\ 0 & T_a < T_2 \end{cases} \tag{5}$$

$$P_s = P - P_r \tag{6}$$

式中: P_r ——降雨量,mm; P ——降水量,mm; P_s ——降雪量,mm; T_1, T_2 ——临界温度,分别取3℃和0℃。
受观测水平的限制,无法得到每小时的降水量,因此,假设日降水量均匀地分布在1d之中,即每小时的降水量是当天降水量的1/24。

3.2 日温

在融雪模型中,温度是一个十分重要的物理量,其不仅关系到某个小时的降水形态,而且在计算冻融过程中还对各热通量的值产生很大影响。因此,准确地模拟1d的温度过程显得意义重大。

3.2.1 正弦-指数模型

气温的日变化总体上遵循正弦-指数模型^[15],即白天气温变化为正弦曲线,夜间为指数曲线。根据日最低气温、日最高气温及昼长数据,可建立正弦-指数模型,模拟气温的日变化过程。正弦-指数模型的计算过程见文献[16-18]。

3.2.2 线性模型

伴随太阳辐射的日变化过程,气温相应地出现日变化特征。正午太阳高度角最大时太阳辐射最强,但地面储存的热量传递给大气需要一个过程,所以气温最高值的出现时间相对滞后,其不是出现在正午,而是在14:00左右;之后太阳辐射逐渐减弱,地面温度和气温逐渐下降;清晨日出前后地面储存热量减至最少、气温最低^[19]。取年平均日出时刻作为最低温出现时刻,根据查询为7:26,近似取为7:30。而最高温出现时刻为14:00。可依据日最低温度和日最高温度,应用线性插值的方法求得任意时刻的温度:

$$T_a = \begin{cases} T_{\min} + \frac{T'_{\max} - T_{\min}}{16}(7.5 - t_B) & 0 < t_B < 7.5 \\ T_{\min} + \frac{T_{\max} - T_{\min}}{8}(t_B - 7.5) & 7.5 \leq t_B < 14 \\ T_{\max} + \frac{T_{\max} - T'_{\min}}{16}(14 - t_B) & 14 \leq t_B \leq 24 \end{cases} \tag{7}$$

式中: $T_{\min}$ ——计算日最低温度,℃; $T_{\max}$ ——计算日最高温度,℃; $T'_{\min}$ ——以计算日为基准的第2天最低温度,℃; $T'_{\max}$ ——以计算日为基准的前一天最高温度,℃; t_B ——标准(北京)时间。

4 模型应用

4.1 三江源概况

三江源区位于北纬31°39'~36°12'、东经89°45'~102°23'之间。该区河流密布,湖泊、沼泽众多,雪山冰川广布。三江源流域总面积为31.82万km²^[20],其中黄河源流域面积为12.36万km²,长江流域面积约为15.76万km²,澜沧江流域面积为3.70万km²。

三江源区明显地表现为典型的内陆高原气候特征^[21]。气候总体特征表现为太阳辐射强、日照时间长、昼夜温差大、冷暖两季交替、蒸发量高、干旱少雨且降雨分布差异大。三江源区冷季长达7个月,年日照时数为2250~3131h,多年平均气温5.0~-4.0℃。

三江源区多年平均蒸发量约为1350mm,多年平均降水量约为410mm。平均年降水量在262.2~772.8mm之间,从三江源区的18个气象站多年平均降水量平均值来看,源区大部分地区多年平均降水量在500mm以下,只有3个气象站多年平均降水量在500mm以上,分别为久治气象站(降水量655.8mm/a)、班玛气象站(降水量606.0mm/a)、河南县气象站(降水量517.2mm/a)。降水量季节分布不均,降水主要集中在6—9月份,约占全年降水量的86%~90%,并有夜雨多、降雨日数多、降雨强度小的特征。

4.2 水文和气象资料

三江源区处于中国的高寒地区,观测资料有限。整个区域只有18个气象站。气象资料主要包括日雪深、日雪压、气温、地温、日降水量、蒸发量、风速、日最大冻土深度、日平均风速、日平均相对湿度、日照时数。

5 结果分析

为了验证模型模拟效果,选取测得积雪天数最多的 3 个气象站的资料进行结果验证,其中测得积雪天数最多的是清水河气象站,其次为甘德气象站和达日气象站。分别采用日模型和小时模型进行模拟。在小时模型中,分别采用线性模型以及正弦-指数模型来模拟温度。雪水当量(SWE)是指当积雪完全融化后得到的水所形成水层的垂直深度。雪压是指单位水平面上所受到的积雪压力。雪压(g/cm^2)是雪深(cm)和雪密度(g/cm^3)的乘积,从数值上来说雪水当量的值等于雪压的值。实测资料有 2005—2006 年的雪深和雪压数据。

由图 1 可以看出,清水河气象站 1 a 中积雪较多的时段主要是冬季和春季,6—9 月基本没有积雪。清水河气象站测得 2005 年 11 月积雪深度最高,达到 16 cm,然后在太阳辐射的影响下积雪慢慢消融,直至次年 2 月;在 3—5 月又有新一轮的积融雪过程。

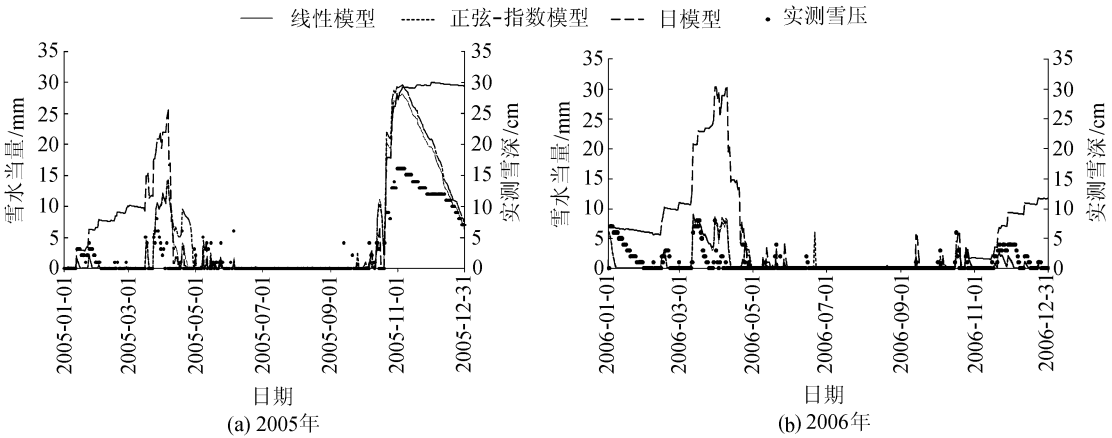


图 1 清水河气象站雪水当量与雪深对比

Fig. 1 Comparison of snow water equivalent and snow depth at Qingshuihe Meteorological Station

在春季,日模型的模拟效果明显不如小时模型,计算出的雪水当量值明显偏大,并且不能很好地反映积雪消融的过程。线性模型和正弦-指数模型在模拟积雪累积过程时效果相当,并且最高值基本相同。在 4 月中下旬,线性模型在模拟积雪融化的过程时更加敏感,呈现积雪消融得更快的结果。但总体来说,小时模型对于积雪消融的模拟仍不太理想。造成这样的结果主要是因为在模型计算过程中为简化考虑将地热通量考虑为零,但实际上春季地热通量对积雪消融的影响较大。

在冬季,3 个模型均能较好地模拟积雪累积的过程,并且计算出的最高值没有较大差异。但是从 11 月达到积雪深度最高值开始,在太阳辐射等多种因素的影响下,积雪深度慢慢下降。日模型计算出的雪水当量基本维持不变,而 2 个小时模型均能反映出积雪深度的变化。这主要是由于日模型中采用的温度数据是日平均气温,积融雪变化与温度关系十分密切。一天中的平均气温很低,用模型算出的辐射值不能让积雪消融,但实际上在一天中温度较高的某个时间段积雪会因为温度的升高而融化。因此,不论是线性模型或者正弦-指数模型,均能较好地反映一天中温度的变化,也就能更好地模拟积雪消融的过程。另外,在计算程序中以温度为阈值来辨别降水状态,所以在日模型中只要温度足够低,就认为一天中所有的降水量都是降雪量,从而导致日模型模拟的结果普遍偏大。清水河气象站 2006 年的模拟结果(图 1(b))也能体现这一缺陷。

为了进一步验证日模型与小时模型的模拟效果,将雪水当量与实测雪压值进行对比。从图 2 可以看出,小时模型的模拟结果与实测雪压值更加接近,但是在春季

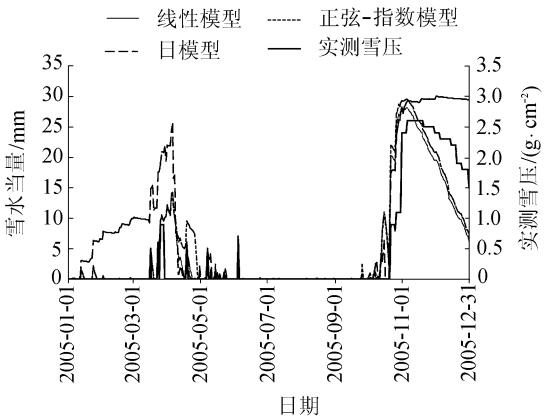


图 2 2005 年清水河气象站雪水当量与实测雪压对比

Fig. 2 Comparison of snow water equivalent and observed snow pressure at Qingshuihe Meteorological Station in 2005

积雪消融时模拟效果不太理想。原因与图 1 分析的基本一致。2005 年清水河气象站积雪的密度大致为 0.1 g/cm^3 。一般新雪的密度为 $0.05\sim0.1\text{ g/cm}^3$,与实际情况比较接近。由于其他站的其他年份积雪量远远小于清水河气象站,可以将积雪密度定为 0.1 g/cm^3 ,直接采用雪水当量与积雪深度进行比较。限于篇幅,其他两站的模拟结果不一一展示。

6 结 语

基于水量平衡与能量平衡原理,分别建立了以日为步长和小时为步长的融雪模型。由于雪盖的变化情况与当地温度紧密相关,而三江源地区一天内温度变化剧烈。因此,从理论上分析以小时为步长的融雪模型能够更好地模拟雪水当量。从实际模拟的效果看,以小时为步长的融雪模型能够更好地模拟三江源地区积雪融雪变化情况。尤其是在积雪深度较厚的情况下,采用小时模型的优势更加明显。

本研究在温度模拟方面也做了有效的尝试。通过建立线性模型来模拟一天内温度的变化,并通过以小时为步长的融雪模型检验其模拟效果。从模拟结果可以看出,线性模型能够更好地表现因温度变化带来的积雪厚度变化。另一方面正弦-指数模型需要大量的资料,计算过程比较复杂,因此,在资料缺乏的时候可以采用线性模型来模拟日温。

模型在计算的过程中将地热通量简单地考虑为零,在模拟春季积雪消融时会产生较大的误差。因此,对地热通量进行深入研究,完善能量平衡法的理论,是模型将改进的方向之一。除此以外,本文呈现的是针对单点进行融雪率的研究,下一步将在整个源区进行面尺度研究。

参考文献:

[1] 李培基. 中国季节积雪资源初步评价[J]. 地理学报,1988,43(2):108-119. (LI Peiji. Preliminary evaluation of seasonal snow resources in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1988,43(2):108-119. (in Chinese))

[2] 高燕. 时间尺度对半干旱半湿润流域洪水预报模型的影响研究[D]. 山西:太原理工大学,2008.

[3] 卿文武,陈仁升,刘时银. 冰川水文模型研究进展[J]. 水科学进展,2008,19(6):894-899. (QING Wenwu, CHEN Rensheng, LIU Shiyin. Progress in study of glacier hydrological model[J]. Advances in Water Science, 2008,19(6):894-899. (in Chinese))

[4] 赵求东,刘志辉,秦荣茂,等. 融雪模型研究进展[J]. 新疆农业科学,2007,44(6):734-739. (ZHAO Qiudong, LIU Zhihui, QIN Rongmao, et al. Research advance of snowmelt model[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2007,44(6):734-739. (in Chinese))

[5] 杨秀松,姜卉芳. 融雪型新安江模型在开都河流域的应用研究[J]. 八一农学院学报,1987(4):82-90. (YANG XiuSong, JIANG Huifang. An applied study on the snowmelt type of Xin'anjiang watershed model at the Kaidu River basin[J]. Journal of August 1st Agri. College, 1987(4):82-90. (in Chinese))

[6] 穆振侠,姜卉芳. 基于数字高程模型建立融雪型新安江模型[J]. 新疆农业大学学报,2009,32(5):75-80. (MU Zhenxia, JIANG Huifang. Establishment of snowmelt-type Xin'anjiang watershed model based on digital elevation model[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2009,32(5):75-80. (in Chinese))

[7] 俞鑫颖,刘新仁. 分布式冰雪融水雨水混合水文模型[J]. 河海大学学报:自然科学版,2002,30(5):23-27. (YU Xinying, LIU Xinren. Distributed hydrological model for watersheds supplemented with melted snow and glacier water and rainfall[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2002,30(5):23-27. (in Chinese))

[8] 许慧萍. 考虑季节性冻土的黄河源区流域水文 TANK 模型[D]. 北京:中国地质大学,2009.

[9] 王红娟. 基于 GIS 和 RS 的分布式融雪径流模型在干旱区的应用研究;以乌鲁木齐河为例[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2004.

[10] 黄粤,陈曦,包安明,等. 干旱区资料稀缺流域日径流过程模拟[J]. 水科学进展,2009,20(3):332-336. (HUANG Yue, CHEN Xi, BAO Anming, et al. Daily flow modeling in arid ungauged basin[J]. Advances in Water Science, 2009,20(3):332-336. (in Chinese))

[11] 秦艳. WRF 与干旱区分布式融雪径流模型的耦合及应用研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2010.

[12] BRUTSAERT W. Evaporation into the atmosphere [M]. Netherlands:Kluwer Academic Publishers,1982.

[13] GUSTAFSSON D. The surface energy balance of a snow cover: comparing measurements to two different simulation models [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2001, 70: 81-96.

[14] 赵求东,刘志辉,房世峰,等. 基于 EOS/MODIS 遥感数据改进式融雪模型[J]. 干旱区地理,2007,30(6):916-920. (ZHAO Qiudong,LIU Zhihui,FANG Shifeng,et al. Improved snowmelt model based on EOS/MODIS remote sensing data[J]. Arid Land Geography, 2007,30(6):916-920. (in Chinese))

[15] 曹卫星,罗卫红. 作物系统模拟及智能管理[M]. 北京:华文出版社,2000.

[16] 余卫东,汤新海. 气温日变化过程的模拟与订正[J]. 中国农业气象, 2009,30(3):35-40. (YU Weidong,TANG Xinhai. Simulation and modification of daily variation of air temperature[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009,30(3):35-40. (in Chinese))

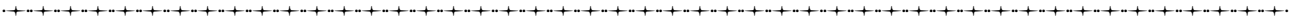
[17] 王炳忠. 太阳辐射知识讲座[J]. 太阳能, 1999,16:12-14. (WANG Binzhong. Solar radiation lectures [J]. Solar Energy, 1999,16:12-14. (in Chinese))

[18] 林慧捷. 时差产生的物理机制及其在气象中的应用[J]. 辽宁气象, 1996(1):46-48. (LIN Huijie. Application of physical mechanism of timing differences in meteorology[J]. Liaoning Meteorological Quarterly, 1996 (1):46-48. (in Chinese))

[19] 张鸣,杨彩玲,陈宏彬,等. 近地层日最高最低气温出现的时间特征[J]. 甘肃高师学报, 2011,16(2):51-53. (ZHANG Ming,YANG Cailing,CHEN Hongbin, et al. Characteristics of daily maximum temperature and minimum temperature appeared time in near surface layer[J]. Journal of Gansu Normal Colleges, 2011,16(2):51-53. (in Chinese))

[20] 冯永忠,杨改河,杨世琦,等. 江河源区地域界定研究[J]. 西北农林科技大学:自然科学版,2004,32(1):11-14. (FENG Yongzhong,YANG Gaihe,YANG Shiqi, et al. Definition on the source regions of Yangtse River, Yellow River and Lantsang River[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Sciences, 2004,32(1):11-14. (in Chinese))

[21] 戴加洗. 青藏高原气候[M]. 北京:气象出版社,1990.



· 简讯 ·

《河海大学学报(自然科学版)》和《水资源保护》
获中国高校科技期刊奖

“第四届中国高校精品·优秀·特色科技期刊奖”颁奖大会于2012年11月22日在济南市召开,由河海大学主办的《河海大学学报(自然科学版)》被评为第四届中国高校优秀科技期刊,《水资源保护》被评为第四届中国高校特色科技期刊。这次评奖活动是教育部科技司委托,由中国高校科技期刊研究会承办的,目的是为推动高校科技期刊出精品、创特色,促进高校科技期刊提高学术影响力和竞争力。通过对科技期刊在科学活动和文献交流中所起的作用及其质量做出客观、全面的评价,以促进高校科技期刊的发展,提高期刊的学术质量和编辑出版质量,扩大我国高校科技期刊在国内外的影响。经专家评审,这次共评出精品科技期刊60种,优秀科技期刊120种,特色科技期刊30种。

(本刊编辑部供稿)