

# 串联复合式热载体加热装置的设计与研究

曹有为, 王述洋\*, 薛国磊, 李三平, 孙雪 (东北林业大学机电工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

**摘要** 首先介绍了串联复合式热载体加热装置在生物质制燃油生产设备中的重要地位, 然后通过对热载体加热工艺流程的分析, 进行了串联复合式热载体加热装置的理论计算与结构设计。最后, 通过试验对装置热能利用率进行了分析。

**关键词** 串联复合式; 加热装置; 工艺流程; 结构设计

**中图分类号** S181.3; TK175 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)32-12686-04

## Research and Design of Tandem Compound Heat Carrier Heating Device

CAO You-wei et al (College of Electromechanical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040)

**Abstract** The important position of tandem compound heat carrier heating device in the production equipment for oil in biomass was introduced through the analysis of the heat carrier heating process, theoretical calculation and structure design of tandem compound heat carrier heating device was conducted. Finally, heat energy utilization rate was analyzed through experiment.

**Key words** Tandem compound; Heating device; Process; Structure design

伴随着我国生物质制燃油技术的发展, 生物燃油应用范围日益广泛, 热载体加热装置作为生物燃油生产过程中的一个重要环节也得到了快速发展, 在生物质制燃油过程中, 热载体作为裂解制油工艺的传热介质, 其种类也越来越多。目前, 大部分热载体加热装置主要存在能耗大、效率低、生产连续性差等缺点, 导致整套制油设备产油率低, 制约了生物质制燃油技术的商业化发展。该研究针对目前热载体加热装置存在的主要问题, 自主设计了一种应用于生物质制燃油生产设备的串联复合式热载体加热装置。

### 1 串联复合式热载体加热装置的意义

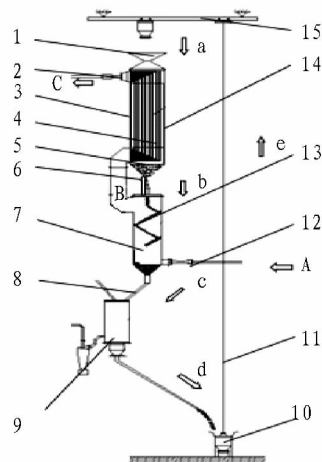
自20世纪80年代以来, 我国一直致力于新能源的开发与利用, 特别是作为可再生能源的生物质能, 已成为一定程度上可替代我国化石燃料的第四大能源。热载体加热工艺是生物燃油生产加工过程中的一个重要环节, 采用热载体直接加热的方式, 能耗高、控制困难, 不利于规模化生产。当前, 提高制油效率、降低能耗、扩大生产规模是生物质热解制燃油技术发展的主题。串联复合式热载体加热装置为生物质制油技术提供一种新型的加热方式, 综合各自优点达到最佳优化效果, 从而为研究高产斜板槽式低能耗精控加热型生物质快速裂解制燃油技术奠定了基础。

### 2 串联复合式热载体装置加热工艺流程

由于纯粹的间接传热方式使热载体的传热速率在反应初始时达不到工艺温度的要求, 完全采取直接的传热方式, 传热效率又过低。因此, 设计一种串联复合式热载体加热装置, 将两个不同加热方式的加热装置串联在一起, 既提高了加热的效率又提高了传热的速率。

热载体加热循环系统工艺流程如图1所示。该系统主要由上炉体、上下炉体连接烟道、流量控制阀、下炉体、高速精温控制装置、燃烧器、主反应器、提升机构、横向移动道轨、

砂箱组成。热载体加热循环系统工作过程如下: 热载体首先经过进热载体口(1)进入上炉体(3), 燃烧机(12)燃烧产生高温烟气通过下炉体(7)和上下炉体间的烟气连接管道(5)进入上炉体(3)内部的管阵(4)中, 二者在上炉体(3)加热管内外壁之间进行间接传热, 热载体的流量通过调节流量控制阀(6)控制, 热载体由上炉体(3)通过流量控制阀(6)进入下炉体(7), 与烟气直接接触传热。充分加热后的热载体通过高速精温控制装置(8)进行温度精确调控, 使其满足工艺温度要求。随后热载体进入主反应器(9), 在主反应器中与物料充分混合传热后流入热载体存储箱(10)。在提升机构(11)的作用下, 将传热后的热载体输送到加热装置最顶端, 通过横向移动道轨(15)输送到上炉体进热载体口(1), 进行循环加热。



注: 1. 进热载体口; 2. 出烟口; 3. 上炉体; 4. 管阵; 5. 烟气连接管道; 6. 流量控制阀; 7. 下炉体; 8. 高速精温控制装置; 9. 主反应器; 10. 热载体存储箱; 11. 提升机构; 12. 燃烧机; 13. 倾斜式挡板; 14. 保温层; 15. 横向移动导轨。

图1 热载体加热循环系统工艺流程

### 3 串联复合式热载体加热装置的理论计算与结构设计

#### 3.1 理论计算

**3.1.1 主要设计参数。** 生物燃油年产量 3 000 t, 生物质加工量 772 kg/h (含水率 10%), 生物质与热载体质量比 1:10,

**基金项目** 国家“863”项目资助(2007AA05Z414)。

**作者简介** 曹有为(1980-), 男, 黑龙江黑河人, 工程师, 博士, 从事生物质能技术研究。\* 通讯作者, 教授, 博士生导师, 从事生物质能源技术与装备研究。

**收稿日期** 2013-10-12

热载体密度:  $\rho = 1\ 700\ \text{kg}/\text{m}^3$ , 不凝气产率 25%, 碳产率 15%。  
原料低位发热值  $Q_{DW不}^Y = 6\ 354\ \text{kJ}/\text{kg}$ ,  $Q_{DW碳}^Y = 20\ 000\ \text{kJ}/\text{kg}$ ,  
 $Q_{DW秸}^Y = 4\ 462\ \text{kJ}/\text{kg}$ 。燃料燃烧效率 95%, 燃烧器效率 95%。  
进热载体口温度  $300\ ^\circ\text{C}$ , 进主反应器热载体温度  $580\ ^\circ\text{C}$ 。

**3.1.2 能量计算。**主反应器内生物质反应能耗小于 1 MJ/kg, 即 1 kg 生物质裂解变混合油蒸气所需热量小于 1 MJ, 取安全系数  $\alpha = 1.1$ 。在主反应器内反应的生物质量为 772 kg/h, 可得裂解生物质能耗:  $Q_{裂} = 849.2\ \text{MJ}/\text{h}$ 。

热平衡公式:

$$Q_{总} = Q_{热载体吸热} + Q_{烟损} + Q_{损} \quad (1)$$

式中:  $Q_{总}$  为每小时加热装置燃烧原料提供的总热量, MJ/h;  $Q_{热载体吸热}$  为每小时热载体在加热装置内吸热量, MJ/h;  $Q_{烟损}$  为每小时加热装置排烟热损失, MJ/h;  $Q_{损}$  为每小时加热装置热损失, MJ/h。

热量计算公式:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t \quad (2)$$

代入相应参数, 根据公式(1)和(2)可计算得  $Q_{热载体吸热} = 2\ 169\ \text{MJ}/\text{h}$ ,  $Q_{烟损} = 1\ 140\ \text{MJ}/\text{h}$ ,  $Q_{损} = 145.15\ \text{MJ}/\text{h}$ ,  $Q_{总} = 3\ 454.15\ \text{MJ}/\text{h}$ 。

**3.1.3 原料用量计算。**

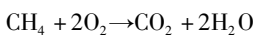
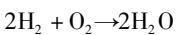
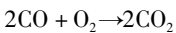
**3.1.3.1 计算 1 kg 不凝气燃烧数据<sup>[1]</sup>。**不凝气各成分体积百分比中  $\text{CO}_2$  为 35%,  $\text{CO}$  为 40%,  $\text{H}_2$  为 10%,  $\text{CH}_4$  为 15%。

标况密度公式:

$$\rho_0 = \frac{1}{22.4} (M_1 X_1 + M_2 X_2 + \dots + M_n X_n) \quad (3)$$

式中,  $\rho_0$  为标况下不凝气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $M_1, M_2, \dots, M_n$  分别为各种气体成分的相对分子量;  $X_1, X_2, \dots, X_n$  分别为各种气体成分的体积百分比。由此可得标况下不凝气密度  $\rho_0 = 1.303\ 6\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。1 kg 不凝气各成分质量:  $m_{\text{CO}_2} = 0.530\ 6\ \text{kg}$ ,  $m_{\text{CO}} = 0.383\ 5\ \text{kg}$ ,  $m_{\text{H}_2} = 0.007\ 1\ \text{kg}$ ,  $m_{\text{CH}_4} = 0.082\ 5\ \text{kg}$ 。

燃烧反应方程式:



根据燃烧过程分析可知产物为:  $\text{CO}_2, \text{N}_2, \text{H}_2\text{O}$ 。

根据燃烧反应方程式, 代入相应数据可计算得标况下理论烟气体积:  $V_Y^0 = 2.597\ 3\ \text{m}^3$ 。

标况下实际烟气体积公式<sup>[2]</sup>:

$$V_Y = V_Y^0 + (1 + 0.001\ 61d)(\alpha - 1)V_k^0 \quad (4)$$

式中,  $V_Y$  为标况下实际烟气体积,  $\text{m}^3$ ;  $V_Y^0$  为标况下理论烟气体积,  $\text{m}^3$ ;  $d$  为干空气中水蒸气含量, 取  $d = 10\ \text{g}/\text{kg}$ ;  $\alpha$  为过量空气系数, 取  $\alpha = 1.1$ ;  $V_k^0$  为理论空气量,  $\text{m}^3$ 。代入相应数据, 可计算得  $V_{Y不} = 2.802\ 5\ \text{m}^3$ 。同理, 可得 1 kg 碳粉燃烧产生标况下实际烟气体积  $V_{Y碳} = 9.933\ \text{m}^3$ 。

**3.1.3.2 计算 1 kg 秸秆气燃烧数据。**秸秆气各成分体积百分比<sup>[3]</sup>中  $\text{CO}$  为 21.4%,  $\text{H}_2$  为 12.2%;  $\text{CH}_4$  为 1.87%,  $\text{CO}_2$  为 13%,  $\text{O}_2$  为 1.65%,  $\text{N}_2$  为 49.88%。根据公式(3)可求得标况下秸秆气密度  $\rho_0 = 1.194\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

根据公式(4)可得 1 kg 秸秆气燃烧产生标况下实际烟气体积  $V_{Y秸} = 1.513\ 6\ \text{m}^3$ 。

**3.1.3.3 秸秆气用量计算。**将产生的不凝气和碳作为原料全部燃烧掉, 设每小时需要补充  $m_{\text{秸}}\ \text{kg}$  秸秆气。

热平衡方程:

$$(Q_{DW不}^Y \cdot m_{不} + Q_{DW碳}^Y \cdot m_{碳} + Q_{DW秸}^Y \cdot m_{秸}) \times \eta_1 \times \eta_2 = Q_{热载体吸热} + Q_{烟损} + Q_{损} \quad (5)$$

式中:  $Q_{DW不}^Y, Q_{DW碳}^Y, Q_{DW秸}^Y$  为不凝气、碳、秸秆气低位发热值,  $\text{kJ}/\text{kg}$ ;  $m_{不}, m_{碳}, m_{秸}$  为每小时燃烧不凝气、碳、秸秆气质量,  $\text{kg}/\text{h}$ ;  $\eta_1, \eta_2$  为燃料燃烧效率、燃烧器效率。将“3.1.1”和“3.1.2”相应数据代入公式(5), 可求得  $m_{\text{秸}} = 143$ , 即每小时需要补充燃烧秸秆气 143 kg, 以维持热载体加热循环系统热平衡。

**3.2 结构设计**

**3.2.1 上炉体结构设计。**烟道入口截面积计算公式<sup>[4]</sup>:

$$F = \frac{V}{\omega} \quad (6)$$

式中,  $F$  为烟道入口截面积,  $\text{m}^2$ ;  $V$  为烟道入口流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\omega$  为烟气流速,  $\text{m}/\text{s}$ 。带入数据, 得  $V = 1.816\ 0\ \text{m}^3/\text{s}$ , 考虑金属管道机械引风, 选取  $\omega = 13\ \text{m}/\text{s}$ , 可求得  $F = 0.14\ \text{m}^2$ 。烟道入口半径公式:

$$d = 2\sqrt{\frac{F}{\pi}} \quad (7)$$

式中,  $d$  为烟道入口半径,  $\text{m}$ 。带入数据, 可求得  $d = 0.422\ \text{m}$ 。

烟管数量计算公式:

$$\eta_{\text{管}} = \frac{4F}{\pi \cdot \varphi^2} \quad (8)$$

式中,  $\eta_{\text{管}}$  为烟管数量, 根;  $\varphi$  为烟管内径,  $\text{mm}$ 。带入数据, 可求得  $\eta_{\text{管}} \approx 245$ (根)。

多层圆筒壁导热公式<sup>[5]</sup>:

$$\Phi = \frac{\Delta t}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi\lambda_i l_{\text{管}}} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} \quad (9)$$

式中,  $\Phi$  为单根管热流量,  $\text{J}$ ;  $\Delta t$  为平均温差,  $^\circ\text{C}$ ;  $\lambda_i$  为各种导热介质的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $l_{\text{管}}$  为导热管长,  $\text{m}$ ;  $d_i$  为各圆筒半径,  $\text{m}$ 。将管阵的导热等效成两层圆筒壁导热模型, 取  $n = 2$ 。

则公式(9)可转化成:

$$\Phi = \frac{\Delta t}{\frac{1}{2\pi\lambda_1 l_{\text{管}}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda_2 l_{\text{管}}} \cdot \frac{d_3}{d_2}} \quad (10)$$

由公式(10)可推导管长公式:

$$l_{\text{管}} = \frac{\Phi \cdot \left( \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{\lambda_1} + \frac{\ln \frac{d_3}{d_2}}{\lambda_2} \right)}{2\pi \cdot \Delta t} \quad (11)$$

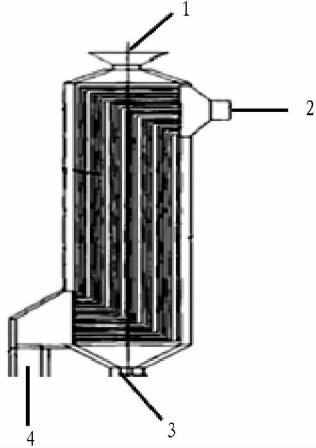
带入相应数据, 可求得  $l_{\text{管}} = 3.8\ \text{m}$ 。

考虑导热效果, 选用外径为  $\phi 32\ \text{mm}$ , 壁厚为  $2.5\ \text{mm}$ , 长度为  $3.8\ \text{m}$  的标准不锈钢管作为烟管。相临各管间接正三

角形排列,取烟管中心距  $d_0 = 52 \text{ mm}$ ,构成  $900 \times 891 \text{ mm}^2$  的管阵横截面,取上炉体内胆横截面为正方形,边长  $r_{\text{上}} = 1 \text{ m}$ 。

考虑热载体储存情况以及热载体循环过程中始终保持覆盖烟管,有  $0.7l_{\text{炉}} + r = l_{\text{管}}$ ,可得上炉体高度: $l_{\text{上炉}} = 4 \text{ m}$ 。上炉体内壁选用  $10 \text{ mm}$  厚钢板,外壁选用  $5 \text{ mm}$  厚的钢板。

选用耐高温锡纸裹于炉体内胆,防辐射热。选用硅酸铝保温棉填充保温层,燃烧室各侧内壁进行耐火处理,添加耐火层,选用耐火水泥和耐火砖。



注:1. 进热载体口;2. 出烟口;3. 出热载体口;4. 进烟口。

图2 上炉体示意图

**3.2.2 上炉体换热量验算。**经判断有: $T_1 - T_2 > t_2 - t_1$ ,有  $W_{\text{hceph}} < W_{\text{cph}}$ ,所以烟气为最小值流体。

传热效率公式:

$$\varepsilon = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - t_1} \quad (12)$$

式中, $\varepsilon$  为上炉体传热效率; $T_1$  为上炉体进烟口温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $T_2$  为上炉体出烟口处温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $t_1$  为上炉体进热载体口温度, $^{\circ}\text{C}$ 。 $t_2$  为上炉体出热载体口温度, $^{\circ}\text{C}$ 。参数选取: $t_1 = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $T_2 = 360 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\varepsilon = 85\%$ , $t_2 = 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,结构示意图如图2所示。将公式(12)带入相应数据,可求得  $T_1 = 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

根据公式(11),有上炉体管阵热流量公式:

$$Q_{\text{管阵}} = \frac{2\pi n_{\text{管}} l_{\text{管}} \cdot \Delta t}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{\ln\left(\frac{d_3}{d_2}\right)}{\lambda_2}} \quad (13)$$

带入相应数据,可求得  $Q_{\text{管阵}} = 483.7 \text{ kW}$ 。根据公式(2)带入相应数据,可求得  $Q_{\text{热载体吸热上}} = 430 \text{ kW}$ 。经比较,有  $Q_{\text{管阵}} > Q_{\text{热载体吸热上}}$ ,所以上炉体设计符合要求。

**3.2.3 下炉体结构设计。**下炉体设计成圆柱形,根据经验选取下炉体内置斜板倾角为  $35^{\circ}$ ,选取长  $1.5 \text{ m}$ ,厚  $3 \text{ mm}$  的钢板,取3回合。

通过理论计算与CAD绘图,可确定以下主要参数:下炉体高度: $l_{\text{下炉}} = 7 \text{ m}$ ;下炉体内胆截面直径: $r_{\text{下}} = 1 \text{ m}$ ;下炉体内胆体积  $V_{\text{下}} = 5.50 \text{ m}^3$ ,下炉体底端两侧(方向成  $90^{\circ}$ )设置燃烧室,燃烧室高度  $h_{\text{燃烧室}} = 0.5 \text{ m}$ 。

试验测得,热载体流经下炉体所用时间  $t \approx 5 \text{ s}$ 。

炉膛截面积计算公式:

$$F = \frac{Q_{\text{燃总}}}{q_a} \quad (14)$$

式中, $F$  为炉膛截面积, $\text{m}^2$ ; $Q_{\text{燃总}}$  为燃料每秒提供总热量, $\text{kW}$ ; $q_a$  为炉膛的截面热负荷, $\text{kW}/\text{m}^2$ 。已知每小时燃烧不凝气量  $m_{\text{不}} = 173.7 \text{ kg}$ ,每小时燃烧碳粉量  $m_{\text{碳}} = 104.22 \text{ kg}$ ,每小时燃烧秸秆气量  $m_{\text{秸}} = 143 \text{ kg}$ ,根据公式(5)可以求得燃料提供热量  $Q_{\text{燃总}} = 959 \text{ kW}$ 。

选取下炉体炉膛的截面热负荷  $q_a = 3000 \text{ kW}/\text{m}^2$ ,下炉体炉膛的体积热负荷  $q_v = 320 \text{ kW}/\text{m}^3$ 。

带入相应数据,可求得  $F = 0.339 \text{ m}^2$ 。

炉膛内径计算公式:

$$r_{\text{下}} = 2\sqrt{\frac{F}{\pi}} \quad (15)$$

式中, $r_{\text{下}}$  为下炉体内胆直径, $\text{m}$ 。带入相应数据,可求得  $r_{\text{下}} = 0.66 \text{ m}$ 。

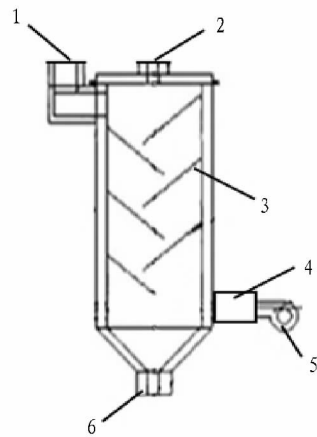
炉膛体积计算公式:

$$V_{\text{下}} = \frac{Q_{\text{燃总}}}{q_v} \quad (16)$$

式中, $V_{\text{下}}$  为炉膛体积, $\text{m}^3$ ; $q_v$  为炉膛的体积热负荷, $\text{kW}/\text{m}^3$ 。

带入相应数据,可求得  $V_{\text{下}} = 3.109 \text{ m}^3$ 。

经比较,有  $r_{\text{下}} > r_{\text{下}}, V_{\text{下}} > V_{\text{下}}$ ,所以下炉体设计(见图3)符合要求。



注:1. 出烟口;2. 进热载体口;3. 斜板;4. 燃烧室;5. 燃烧机;6. 出热载体口。

图3 下炉体示意图

#### 4 热能利用率检测试验

同一天分3个时间段进行采样,共计3组采样数据,按均值计算。

$$\bar{x} = \frac{\sum(x_1 + x_2 + \dots + x_n)}{n} \quad (17)$$

取  $n = 3$ ,进行检测与计算。

热能利用率计算公式:

$$\eta = \frac{\text{观测时段热载体吸收总热量}}{\text{观测时段燃料提供总热量}} \times 100\% \quad (18)$$

每组采样观测时段均为  $20 \text{ min}$ ,共3组,将表1中检测

数据带入公式(18)。

表 1 串联复合式热载体加热装置检测报告

采样时段	采样时间	下炉体出口热载体温度//℃	上炉体入口热载体温度//℃	热载体流速//kg/s	20 min 热载体流量//kg	20 min 秸秆用量//kg	20 min 燃气消耗量//m <sup>3</sup>	20 min 燃气总热量//MJ
1	9:10	552	211	0.833	1 000	49.43	98.86	454.76
	9:20	555	214	0.833				
	9:30	556	219	0.833				
2	13:30	554	213	0.833	1 000	49.32	98.63	453.71
	13:40	560	220	0.833				
	13:50	558	218	0.833				
3	15:10	550	211	0.833	1 000	49.24	98.47	452.96
	15:20	553	214	0.833				
	15:30	548	209	0.833				

第 1 组:  $Q_{\text{热载体吸热1}} = 340.75 \text{ MJ}$ ,  $\eta_1 = 74.93\%$ 。

第 2 组:  $Q_{\text{热载体吸热2}} = 341.42 \text{ MJ}$ ,  $\eta_2 = 75.25\%$ 。

第 3 组:  $Q_{\text{热载体吸热3}} = 340.08 \text{ MJ}$ ,  $\eta_3 = 75.08\%$ 。

将数据带入公式(17), 串联复合式热载体加热装置平均热能利用率为  $\bar{\eta} = 75.09\%$ 。

通过计算可知, 串联复合式热载体加热装置热能利用率可以达到 75.25%, 平均热能利用率为 75.09%, 满足生物质热解制油工艺要求。

## 5 结论

热载体加热有多种方式, 热载体加热装置的合理设计决

定了生物质热解制油工艺的实施。该研究的设计是将热载体的两种不同加热方式串联复合使用, 以期提高装置的热能利用率, 有利于实现生物质热解制油规模化生产。

## 参考文献

- [1] 汪军. 工程燃烧学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 50-73.
- [2] 刘联胜. 燃烧理论与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 86.
- [3] 袁振宏, 吴创之, 马隆龙. 生物质能利用原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 175.
- [4] 赵明泉. 锅炉结构与设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998: 217-223.
- [5] 陈敏恒, 丛德滋, 方图南, 等. 化工原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 263-271.

(上接第 12655 页)

程对应的流域总降水与水文站峰值流量大小有较好的相关关系, 峰值流量在强降水开始 1~2 d 后出现, 而第 3 次暴雨过程期间总降水与流量大小的相关性不明显。因此, 流域总降水是水文站流量趋势预测的有效参数, 但要进行更精细的流量预测, 还需要在高分辨降水估计基础上对流域做进一步的划分和降水空时分布分型研究。

## 4 结论

(1) 2011 年西安世园会陕西 3 次暴雨过程期间, 流域总降水估计与影响地区灾害风险定量分析表明, 汉中地区灾情明显严重于其他地区, 这与汉江上游降水明显、流域总降水大直接相关。汉江上游流域是陕南灾害预警防控的重点地区, 流域内过程总降水明显增大是引发陕南多种次生灾害的主要因素。汉江上游和汉江下游流域同时出现较大总降水时, 由于上游强降水对下游山洪等灾害的重叠效应和下游水情对上游自然排洪能力的影响, 汉江流域灾情将会有所加重。

(2) 短时强降水频次明显增加时灾情风险随之增大, 降水随时间的不均匀性和突发性也是引发灾害的重要因素。暴雨灾害要从过程总降水和降水时间分布 2 个方面出发进行分析评估。

(3) 基于雷达和气象自动站高分辨资料的降水联合估计方法依据天气系统的时空连续性, 利用邻近降水实况信息自适应地调节待估网格单元的降水反演参数, 估计性能优于常系数和分段最优方法。结合空间网格划分, 高分辨资料降水

联合估计得到的流域总降水是相关地区水文流量趋势预测的有效参数。

## 参考文献

- [1] 杜继稳. 降雨型地质灾害预报预警——以黄土高原和秦巴山区为例[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 刘传正, 温铭生, 唐灿. 中国地质灾害气象预警初步研究[J]. 地质通报, 2004, 23(4): 304-309.
- [3] 岳建伟, 王斌, 刘国华, 等. 地质灾害预警预报及信息管理系统应用研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(6): 60-63.
- [4] 陈守煜, 李庆国, 李敏. 基于模糊优选神经网络与 GIS 结合的流域面雨量预测方法[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(2): 163-166.
- [5] 张雅斌, 杜继稳, 蔡蕊, 等. 陕西省精细化地质灾害气象预报预警研究[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 28-34.
- [6] 陆桂华, 吴娟, 吴志勇. 水文集合预报试验及其研究进展[J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 728-732.
- [7] 刘家福, 梁雨华, 马国斌. 基于 GIS 的淮河流域洪水灾害综合风险评估[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(5): 2510-2511.
- [8] 徐晶, 姚学祥. 流域面雨量估算技术综述[J]. 气象, 2007, 33(7): 15-20.
- [9] 王志, 赵琳娜, 张国平, 等. 汶川地震灾区堰塞湖流域面雨量计算方法研究[J]. 气象, 2010, 36(6): 7-12.
- [10] 姚燕飞, 程明虎, 杨洪平, 等. 优化 ZI 关系及其在淮河流域面雨量测量中的应用[J]. 气象, 2007, 33(6): 37-43.
- [11] 祝新建, 臧新洲. 河南省获嘉县气象灾害风险评估系统研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(26): 12873-12875.
- [12] 张雅斌. 基于加密探测资料的流域面雨量估计与水情预测方法研究[C]//第 28 届中国气象学会年会. 厦门, 2011.
- [13] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊延南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 221-225.
- [14] 袁艺, 王玉玲. 近 30 年我国自然灾害灾情时间分布特征分析[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 61-64.
- [15] 赵飞, 廖永丰, 张妮娜, 等. 登陆中国台风灾害损失评估模型研究[J]. 灾害学, 2011, 26(2): 81-85.
- [16] 李良序, 罗慧. 陕西省气象暨 2011 西安世界园艺博览会气象服务评估报告[M]. 北京: 气象出版社, 2012: 84-86.