

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190310

坡面流的 Lattice Boltzmann 方法数值模拟

刘战军, 刘宁宁

(山东省海河淮河小清河流域水利管理服务中心, 山东 济南 250100)

摘要:以一维运动波方程为研究对象, 给出 Lattice Boltzmann 方法的 D1Q5 速度模型在一维坡面流的数值模拟中的具体步骤, 并将其计算结果与解析解进行比较, 同时分析了步长和弛豫时间的选取对计算精度的影响。结果表明: Lattice Boltzmann 方法可以较好地应用于坡面流数值模拟中, 空间步长的选取对计算精度的影响较大, 弛豫时间的取值应在[1.0, 1.2]范围内为宜。

关键词: Lattice Boltzmann 方法; 一维坡面流; 平衡态分布函数; 弛豫时间

中图分类号: TV131.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2020)03-0029-05

坡面流是指重力作用下顺坡面流动的浅层水流, 与明渠水流相比, 更容易受地形、降雨、地表糙率的影响, 其非线性特性要比明渠水流更为突出^[1-2]。目前处理坡面流问题的水力学途径主要是采用有限差分、有限单元、有限体积等离散方法求解带源项的圣维南方程组或其简化形式得到坡面流的流量、水深、流速时空分布等信息^[3-5]。这些离散方法对每个时间步长都要计算大型线性方程组, 对于模拟大规模的流体流动, 计算机的计算速度和计算效率是一个不可忽略的问题。再者对于强非线性的微分方程, 有限差分和有限单元法容易产生数值弥散和数值震荡^[6], 数值稳定性是一个很大的问题。Lattice Boltzmann 方法是基于介观动力学模型提出来的, 它认为流体的宏观运动特征是微观粒子集体行为的统计平均结果, 相较传统宏观方法, 具有清晰的物理背景。另外, Lattice Boltzmann 方法在求解非线性偏微分方程组时, 将其转化为 Lattice Boltzmann 演进方程, 使之变为简单的线性方程, 不仅使得计算得到大大简化, 计算时间大大缩短, 而且计算是局部的, 具有良好的并行性和可扩展性, 在大规模流动问题的计算^[7-10]和强非线性方程的求解^[11-13], 以及复杂边界问题^[14-16]的处理上, 相比传统宏观方法有很大优势。描述坡面水流运动的运动波方程是修正的 Burgers 方程在水文学中的应用, 近年来, 对 Lattice Boltzmann 方法应用于 Burgers 方程求解做了大量研究: 阎广武^[17]利用多

尺度展开技术, 通过选择平衡态分布函数的高阶矩, 给出了 Burgers 方程的格子 Boltzmann D1Q3 和 D1Q5 模型; 段雅丽^[19]给出了修正的 Burgers 方程的格子 Boltzmann D1Q3 模型, 并对其稳定性进行了分析; Li^[18]等研究了二维耦合 Burgers 方程的格子 Boltzmann D2Q9 和 D2Q5 模型, 并对模型的合理性在理论上进行了分析。本文在前人对修正的 Burgers 方程研究的基础上, 利用 Lattice Boltzmann 方法在求解非线性方程上的优势, 将其运用到坡面流运动波模型数值模拟中, 并进行讨论分析。

1 坡面流模型

坡面流运动的力学特性十分复杂, 一般对坡面流采取简化处理, 实际应用中以运动波模型为主, 即, 忽略圣维南方程组动量方程中的各导数项, 认为坡面坡度等于坡面阻力坡度, 利用 Chezy 公式和 Manning 公式, 得到运动波方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i_e(x, t) \\ q = \frac{1}{n} h^{\frac{5}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: h 为水深(m); $q=vh$ 为单宽流量(m^2/s), v 为坡面流速(m/s); $i_e(x, t)$ 为单宽净雨输入(m/s), $i_e(x, t)=i(x, t)-f(x, t)$, $i(x, t)$ 为降雨强度(m/s), $f(x, t)$ 为下渗率(m/s);

收稿日期: 2019-09-19

作者简介: 刘战军(1963-), 女, 山东郯城人, 本科, 高级工程师, 主要从事防汛、工程管理和工程调度工作。E-mail: liuzhanjun4471@126.com

S_0 为坡面坡度; n 为 Manning 糙率系数。

初始条件和边界条件为:

$$\begin{cases} h(x,0)=0 & 0 \leq x \leq L \\ h(0,t)=0 & t \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: L 为坡面长度。

2 一维坡面流 Lattice Boltzmann 模型的建立

2.1 Lattice Boltzmann 方程

Lattice Boltzmann 方法将空间剖分成均匀网格, 在每个节点上布置粒子分布函数 $f_\alpha(\tilde{x}, \tilde{e}_\alpha, t)$, 强调大量粒子的平均特性而忽略粒子之间的相互作用关系, 根据其物理特性, 碰撞项采用 BGK 近似^[1], 得到演进方程:

$$f_\alpha(\tilde{x}+\Delta t \cdot \tilde{e}_\alpha, \tilde{e}_\alpha, t+\Delta t) - f_\alpha(\tilde{x}, \tilde{e}_\alpha, t) = \Omega_\alpha(f_\alpha(\tilde{x}, \tilde{e}_\alpha, t)) + (\Delta t)^4 \cdot g_\alpha(\tilde{x}, \tilde{e}_\alpha, t) - \frac{1}{\tau} (f_\alpha(\tilde{x}, \tilde{e}_\alpha, t) - f_\alpha^{eq}(\tilde{x}, \tilde{e}_\alpha, t)) \quad (3)$$

式中: $f_\alpha(\tilde{x}, \tilde{e}_\alpha, t)$ 为流体粒子的分布函数; $\Omega_\alpha(f_\alpha(\tilde{x}, \tilde{e}_\alpha, t))$ 为碰撞项; τ 为弛豫时间; $f_\alpha^{eq}(\tilde{x}, \tilde{e}_\alpha, t)$ 为平衡态分布函数; $g_\alpha(\tilde{x}, \tilde{e}_\alpha, t)$ 为源项, 在本文中为降雨; α 为方向, 与选取的离散速度模型有关。

粒子分布函数按照一定规则在网格上进行碰撞和迁移, 并通过统计平均得到宏观量^[9]。碰撞和迁移过程分别由式(4)和式(5)确定。

$$\begin{aligned} \text{碰撞过程: } f_\alpha^{new}(\tilde{x}, \tilde{e}_\alpha, t) &= f_\alpha(\tilde{x}, \tilde{e}_\alpha, t) - \frac{1}{\tau} (f_\alpha(\tilde{x}, \tilde{e}_\alpha, t) \\ &- f_\alpha^{eq}(\tilde{x}, \tilde{e}_\alpha, t)) + (\Delta t)^4 \cdot g_\alpha(\tilde{x}, \tilde{e}_\alpha, t) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{运移过程: } f_\alpha^{new}(\tilde{x}+\Delta t \cdot \tilde{e}_\alpha, \tilde{e}_\alpha, t+\Delta t) = f_\alpha^{new}(\tilde{x}, \tilde{e}_\alpha, t) \quad (5)$$

在碰撞过程中, 碰撞项需要满足质量和动量守恒条件:

$$\sum_\alpha \Omega_\alpha = 0 \quad \sum_\alpha \tilde{e}_\alpha \cdot \Omega_\alpha = 0 \quad (6)$$

2.2 一维坡面流的 Lattice Boltzmann 模型

构造 Lattice Boltzmann 模型的关键在于选择合适的平衡态分布函数, 而平衡态分布函数的具体表达式又与离散速度模型的构造有关, Qian 等人提出的 DnQb 模型(n 是空间维数, b 是离散速度数)是最具有代表性的离散速度模型^[11], 对于一维问题, 经常采用 D1Q3 或 D1Q5 模型^[20]。为了使计算精度更高一些, 本文尝试采用 D1Q5 五速模型, 即在每个网格点上存在 5 类速度不同的粒子, 速度大小分别为: $-2c$ 、 $-c$ 、 0 、 c 、 $2c$, c 为网格步长 Δx 与时间步长 Δt 之比, 即: $c = \Delta x / \Delta t$ 。同

时, 采用对空间坐标并不进行多尺度处理, 而对时间坐标引入五个时间尺度的展开方式, 其微分形式为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t_0} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t_1} + \varepsilon^2 \frac{\partial}{\partial t_2} + \varepsilon^3 \frac{\partial}{\partial t_3} + \varepsilon^4 \frac{\partial}{\partial t_4} + o(\varepsilon^5) \\ \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} + o(\varepsilon) \end{cases} \quad (7)$$

式中: ε 是一个微量, 称为 Knudsen 数, 表示粒子平均自由路径与宏观流动中特征长度的比值, $1/\varepsilon$ 与网格划分的规模相当, 粒子分布函数可相应展开为:

$$f_\alpha = f_\alpha^{(0)} + \varepsilon f_\alpha^{(1)} + \varepsilon^2 f_\alpha^{(2)} + \varepsilon^3 f_\alpha^{(3)} + \varepsilon^4 f_\alpha^{(4)} + o(\varepsilon^5) \quad (8)$$

对式(3)每一项进行多尺度展开, 最终得到五个不同时间尺度的离散 Boltzmann 方程为:

$$o(\varepsilon^0): f_\alpha^{(0)} = f_\alpha^{eq} \quad (9)$$

$$o(\varepsilon^1): \left(\frac{\partial}{\partial t_0} + \tilde{e}_\alpha \frac{\partial}{\partial x} \right) f_\alpha^{(0)} = -\frac{1}{\tau} f_\alpha^{(1)} \quad (10)$$

$$o(\varepsilon^2): \frac{\partial f_\alpha^{(0)}}{\partial t_1} + \left(\frac{1}{2} - \tau \right) \left(\frac{\partial}{\partial t_0} + \tilde{e}_\alpha \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 f_\alpha^{(0)} = -\frac{1}{\tau} f_\alpha^{(2)} \quad (11)$$

$$o(\varepsilon^3): \frac{\partial f_\alpha^{(0)}}{\partial t_2} + \left(2 - \frac{1}{\tau} \right) \frac{\partial f_\alpha^{(1)}}{\partial t_1} + \left(\tau^2 - \tau + \frac{1}{6} \right) \left(\frac{\partial}{\partial t_0} + \tilde{e}_\alpha \frac{\partial}{\partial x} \right)^3 f_\alpha^{(0)} = -\frac{1}{\tau} f_\alpha^{(3)} \quad (12)$$

$$o(\varepsilon^4): \begin{aligned} & (1-2\tau) \left(\frac{\partial}{\partial t_0} + \tilde{e}_\alpha \frac{\partial}{\partial x} \right) \frac{\partial f_\alpha^{(0)}}{\partial t_2} \\ & + \left(\frac{3\tau^2}{2} - \tau^3 - \frac{7\tau}{12} + \frac{1}{24} \right) \left(\frac{\partial}{\partial t_0} + \tilde{e}_\alpha \frac{\partial}{\partial x} \right)^4 f_\alpha^{(0)} \\ & + \left(1 - \frac{1}{2\tau} \right) \frac{\partial f_\alpha^{(2)}}{\partial t_1} + \frac{\partial f_\alpha^{(0)}}{\partial t_3} + \left(2\tau^2 - 2\tau + \frac{1}{4} \right) \\ & \left(\frac{\partial}{\partial t_0} + \tilde{e}_\alpha \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial f_\alpha^{(0)}}{\partial t_1} = -\frac{1}{\tau} f_\alpha^{(4)} + g_\alpha \end{aligned} \quad (13)$$

其中: $g_2 = g_1 = g_0 = g_3 = g_4 = \frac{i_e(x, t)}{5\varepsilon}$ 。

对式(8)两边求和, 根据质量守恒可得:

$$\begin{cases} \sum_\alpha f_\alpha^{(1)} = \sum_\alpha f_\alpha^{(2)} = \sum_\alpha f_\alpha^{(3)} = \sum_\alpha f_\alpha^{(4)} = 0 \\ \sum_\alpha f_\alpha = \sum_\alpha f_\alpha^{(0)} = \sum_\alpha f_\alpha^{eq} \end{cases} \quad (14)$$

为建立 D1Q5 模型的平衡态分布函数与宏观量之间的联系, 对式(9)~(13)分别求零阶矩, 并与宏观方程(1)比较, 具体步骤详见文献[21]可得:

$$\begin{aligned} \sum_\alpha f_\alpha^{(0)} &= h; \quad \sum_\alpha \tilde{e}_\alpha f_\alpha^{(0)} = \beta h m; \quad \sum_\alpha \tilde{e}_\alpha^2 f_\alpha^{(0)} = \beta^2 m^2 \frac{h^{2m-1}}{2m-1}; \\ \sum_\alpha \tilde{e}_\alpha^3 f_\alpha^{(0)} &= \beta^3 m^3 \cdot \frac{h^{3m-2}}{3m-2}; \quad \sum_\alpha \tilde{e}_\alpha^4 f_\alpha^{(0)} = \beta^4 m^4 \frac{h^{4m-3}}{4m-3}; \\ \sum_\alpha g_\alpha &= i_e(x, t) \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $\beta = \frac{1}{n} S^{0.5}$; $m = 5/3$ 。

为确保宏观量选取和多尺度展开方案的正确性,需进行还原过程,即通过计算看能否还原回原运动波方程。对五个不同时间尺度的离散 Boltzmann 方程在不同方向上进行多尺度粘合,得:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\beta h^m)}{\partial x} = i_e(x, t) + o(\epsilon^4) \quad (16)$$

将式(16)与式(1)相比较,仅相差 $o(\epsilon^4)$,其中 $o(\epsilon^4)$ 可通过 τ 的调整来消除。D1Q5 模型对应的运动波方程的平衡态分布函数可由式(15)求得:

$$\begin{cases} f_0^{(0)} = A - \frac{5}{4}C + \frac{1}{4}E \\ f_1^{(0)} = \frac{1}{6}(4C - 4B + D - E) \\ f_2^{(0)} = \frac{1}{24}(2B - 2D + E - C) \\ f_3^{(0)} = \frac{1}{6}(4C + 4B - D - E) \\ f_4^{(0)} = \frac{1}{24}(2D - 2B + E - C) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $A = h$; $B = \frac{\beta h^m}{C}$; $C = \frac{1}{c^2} \cdot \beta^2 m^2 \frac{h^{2m-1}}{2m-1}$;

$D = \frac{1}{c^3} \cdot \beta^3 m^3 \frac{h^{3m-2}}{3m-2}$; $E = \frac{1}{c^4} \cdot \beta^4 m^4 \frac{h^{4m-3}}{4m-3}$ 。

为计算坡面上各节点水深、流速,首先将空间划分成均匀网格,并根据宏观初始水深确定各节点上平衡态分布函数,通过分子群的碰撞、迁移过程,更新各节点上的分布函数,并通过建立微观与宏观的联系,即可

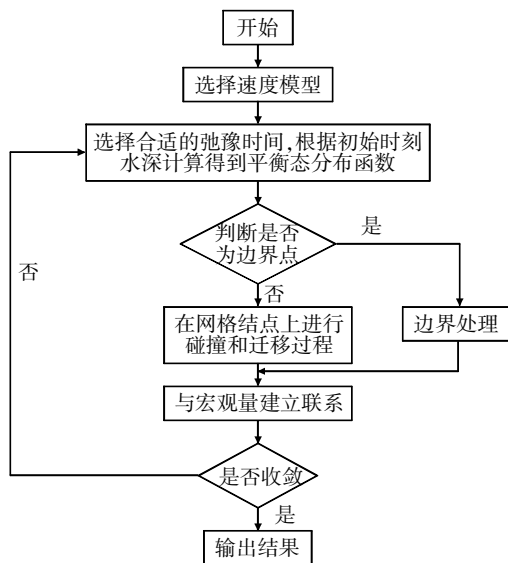


图1 计算流程

Fig.1 The calculation flow

得到不同时刻各结点上的水深、单宽流量。计算流程如图1所示。

3 应用实例

当净雨输入为常数,即降雨强度保持不变,下渗稳定时,可采用特征线法求运动波方程解析解。为验证 Lattice Boltzmann 方法的正确性以及进一步分析其误差特性,特选用净雨输入为常数的算例进行求解分析。

3.1 数值模拟结果

算例取自文献[21]。有一规则矩形不透水坡面,坡面长 $L = 50m$,糙率 $n = 0.015$,坡度 $S_0 = 0.01$,降雨强度 $r = 25mm/h$,降雨历时为 $10min$,退水阶段历时为 $30min$,因为坡面不透水,所以可不计降雨损失。Lattice Boltzmann 方法 D1Q5 模型,取弛豫时间 τ 取 1.1 ,空间步长取 $\Delta x = 1m$,时间步长取 $\Delta t = 1s$ 。计算结果见图 2~4。

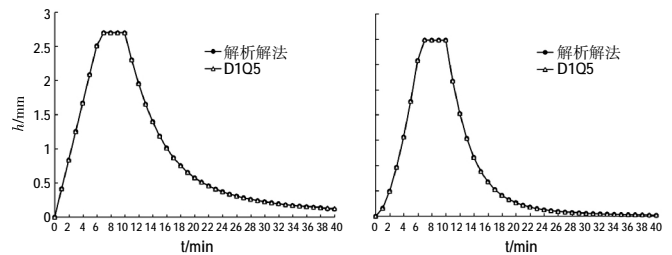


图2 坡脚断面水深和单宽流量随时间变化过程

Fig.2 The variation of time on depth and unit discharge of slope

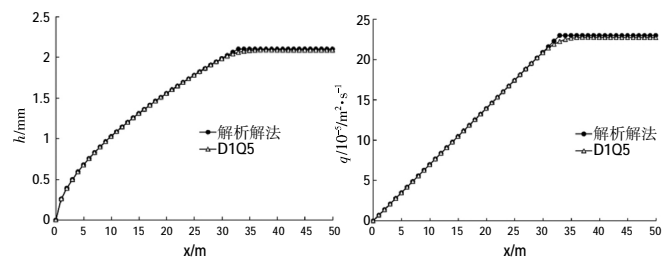


图3 t=5min 时水深和单宽流量沿坡面分布(达到平衡时间之前)

Fig.3 The distribution of depth and unit discharge along slope when t=5min (before equilibrium time)

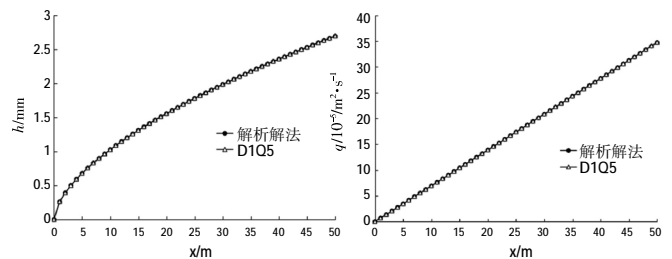


图4 t=10min 时水深和单宽流量沿坡面分布(达到平衡时间之后)

Fig.4 The distribution of depth and unit discharge along slope when t=10min (after equilibrium time)

由图 2-4 可以看出, Lattice Boltzmann 方法的计算结果与解析解的计算结果相比较, 坡脚断面处水深和单宽流量随时间的变化以及达到平衡时间之后水深和单宽流量沿坡面的分布, 拟合较好。达到平衡时间之前(即坡面流上涨段)水深和单宽流量沿坡面的分布, 平衡阶段的拟合较好, 而未达到平衡阶段的则有一定的差别。这是因为, 采用特征线法的解析解是分为未达到平衡前的水流上涨过程、达到平衡时的稳定出流过程、降雨终止后的水流退水过程三部分进行求解的, 平衡阶段和非平衡阶段之间就会有一个明显的转折点。综上, Lattice Boltzmann 方法的计算精度是令人满意的。作者在文献[21]中探讨了该算例的 Pressimann 四点隐式差分格式, Lattice Boltzmann 方法相比于 Pressimann 方法, 计算结果相差无几, 但在计算时间和编程的难易程度上, 明显优于 Pressimann 方法。因此, Lattice Boltzmann 方法可作为今后坡面流模型数值模拟的一个研究方向, 可以尝试更为复杂的计算。

3.2 影响因素分析

Lattice Boltzmann 方法的计算精度主要受到速度模型、边界格式、弛豫时间、步长选取等因素的制约^[22]。本文主要分析步长和弛豫时间的选取对计算精度的影响。

3.2.1 步长选取对计算精度的影响

由图 2-4 可知, 因达到平衡时间之前(即坡面流上涨段)水深和单宽流量沿坡面分布的误差最大, 故以 $t=5\text{min}$ 时单宽流量计算值为分析对象, 将 Lattice Boltzmann 方法的计算结果与解析解进行对比, 计算相对误差 $Er = \frac{|x-x^*|}{x^*} \times 100\%$, 分析步长的选取对计算精度的影响。取弛豫时间 $\tau=1.1$, 首先分析时间步长对计算精度的影响, 即在空间步长 $\Delta x=1$ 的情况下分别选取时间步长 $\Delta t=2$ 、 $\Delta t=1$ 、 $\Delta t=0.5$ 、 $\Delta t=0.2$ 、 $\Delta t=0.1$, 进行计算; 其次分析空间步长对计算精度的影响, 即在时间步长 $\Delta t=1$ 的情况下分别选取空间步长 $\Delta x=10$ 、 $\Delta x=5$ 、 $\Delta x=2$ 、 $\Delta x=1$ 、 $\Delta x=0.5$, 进行计算。相对误差如图 5 所示。

由图 5 可知, 步长的选取对计算精度是有一定影响的。而且空间步长的选取要比时间步长的选取对计算的影响大。这是因为, 空间步长的选取不仅影响着粒子速度而且影响着网格的稀疏, 进而影响粒子碰撞的次数, 而时间步长仅影响着粒子速度。因此, 在计算效

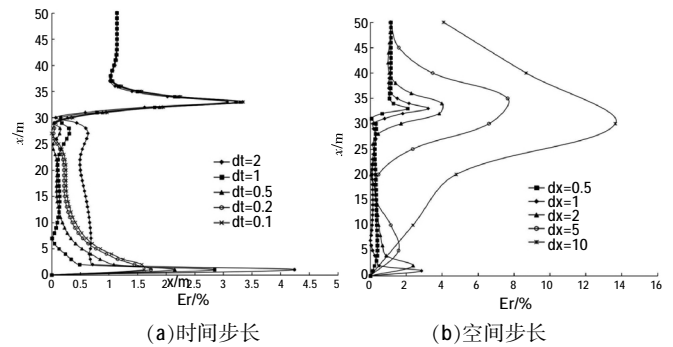


图 5 不同步长的 Lattice Boltzmann 方法的计算误差
Fig.5 The calculated error of Lattice Boltzmann method with different intervals

率允许的情况下, 尽可能选取较小的步长, 对提升计算精度有一定的帮助。

3.2.2 弛豫时间 τ 对计算精度的影响

弛豫时间 τ 表示粒子分布函数趋于平衡态的时间, 是一个无量纲参数。在理论上, 为了满足 LBGK 方程的线性稳定性, 弛豫时间 τ 的取值必须大于 0.5^[9]。但从计算精度的角度出发, 弛豫时间 τ 应存在一个最佳取值范围, 使计算误差最小。本文以 $t=5\text{min}$ 时单宽流量计算值为分析对象, 在 $\Delta x=1\text{m}$ 、 $\Delta t=0.1\text{s}$ 的情况下, 选取不同的弛豫时间 τ , 计算得到坡面上不同位置的单宽流量的相对误差, 计算结果见表 1。

表 1 不同弛豫时间 τ 得到的 $t=5\text{min}$ 时单宽流量的相对误差 $Er(\%)$
Table 1 The Er of unit discharge with different relaxation time when $t=5\text{min}$

坡面位置 x	弛豫时间 τ					
	0.9	1.0	1.1	1.2	1.5	2
5	1.30	0.07	0.85	1.55	2.77	3.52
15	0.45	0.04	0.27	0.57	1.27	1.46
25	0.26	0.04	0.13	0.12	0.19	0.82
35	0.05	1.13	1.57	2.01	3.27	5.20
50	1.14	1.14	1.14	1.14	1.13	1.05

由计算结果可知, 弛豫时间 τ 的取值对单宽流量的计算有较大影响, τ 值取 1.0 时计算结果最接近解析解, τ 值增大或减小都会使误差增大。且由表 1 可知, 在靠近边界的位置上误差要大, 这与 D1Q5 模型的边界格式的处理有一定的关系。综合考虑, 对于坡面流, 本文建议弛豫时间 τ 的取值应在 [1.0, 1.2] 范围内为宜。

4 结论

(1)采用 Lattice Boltzmann 方法的 D1Q5 速度模型对一维坡面流进行数值模拟,并给出了详细的多尺度处理和分布函数确定步骤。

(2)将 Lattice Boltzmann 方法的计算结果与解析解进行比较。结果表明,Lattice Boltzmann 方法能够较好的应用于坡面流数值模拟中。

(3)分析了步长和弛豫时间的选取对计算精度的影响。结果表明,空间步长的选取对计算结果的影响较大,步长选取越小,计算误差越小;弛豫时间 τ 在 1 到 1.2 之间取值时,计算误差较小。

参考文献:

- [1] 刘青泉,李家春,陈力,等.坡面流及土壤侵蚀动力学(I)—坡面流[J].力学进展,2004,34(3):360-372. (LIU Qingquan, LI Jiachun, CHEN Li, et al. Dynamics of overland flow and soil erosion (I)-overland flow [J]. Advance in Mechanics, 2004,34(3):360-372. (in Chinese))
- [2] 芮孝芳.产汇流理论[M].北京:中国水利水电出版社,1995. (RUI Xiaofang. Theory of Runoff Yield and Confluence [M]. Beijing: China Water and Power Press, 1995. (in Chinese))
- [3] Saghafian B, Julien P Y, Rajaie H. Runoff hydrograph simulation based on time variable isochrone technique [J]. Journal of Hydrology, 2002,261:193-203.
- [4] 戚隆溪,黄兴法.坡面降雨径流和土壤侵蚀的数值模拟[J].力学学报,1997,29(3):343-348. (QI Longxi, HUANG Xingfa. Simulation on slope runoff and soil erosion in a raining event [J]. Acta Mechanica Sinica, 1997,29(3):343-348. (in Chinese))
- [5] Costable P, Costanzo C, Macchione F. Comparative analysis of overland flow models using finite volume schemes [J]. Journal of Hydroinformatics, 2012,14(1):122-135.
- [6] 张耀辉.特征有限元法及其在土壤水分运动数值模拟中的应用[D].西安:西安理工大学,2005. (ZHANG Yaohui. Characteristic Finite Element Methods and Application in Numerical Simulation for Water Flow in Soils [D]. Xi'an:Xi'an University of technology, 2005. (in Chinese))
- [7] Koelman J. A simple lattice Boltzmann scheme for Navier-Stokes fluid flow [J]. Europhysics Letters (EPL), 1991,15(6):603-607.
- [8] 程永光,索丽生.二维明渠非恒定流的格子 Boltzmann 模拟[J].水科学进展,2003,14(1):9-14. (CHENG Yongguang, SUO Lisheng. 2-D open channel flow simulations by the Lattice Boltzmann model [J]. Advance in Water Science, 2003,14(1):9-14. (in Chinese))
- [9] 段雅丽.格子 Boltzmann 方法及其在流体力学上的一些应用[D].合肥:中国科技大学,2007. (DUAN Yali. Lattice Boltzmann Method and Some Application to Hydrodynamics [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007. (in Chinese))
- [10] ZHOU Jianguo. A lattice Boltzmann method for solute transport [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2009,61:848-863.
- [11] Qian Y, D'Humieres D, Lallemand P. Lattice BGK model for Navier-Stokes equation [J]. Europhysics Letters, 1992,17:479-484.
- [12] Duan Y L, Kong L H, Guo M. Numerical simulation of a class of nonlinear wave equations by Lattice Boltzmann method [J]. Communications in Mathematics and Statistics, 2017,5(1):13-35.
- [13] 刘芳.格子 Boltzmann 方法求解偏微分方程的相关研究[D].长春:吉林大学,2011. (LIU Fang. Research on Lattice Boltzmann Model for Partial Differential Equations [D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese))
- [14] Ahrenholz B, Tolke J, Lehmann P. Prediction of capillary hysteresis in a porous media: using Lattice-Boltzmann methods and comparison to experimental data and a Morphological pore network model [J]. Advances in Water Resources, 2008.
- [15] 吴家阳.发展浸没边界—格子 Boltzmann 方法模拟水电工程流场[D].武汉:武汉大学,2018. (WU Jiayang. Developing the Immersed Boundary-Lattice Boltzmann Method to Simulate Flow Fields in Hydropower Engineering [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (in Chinese))
- [16] 周昊,芮森,岑可法.多孔介质内流体流动的大涡格子 Boltzmann 方法研究[J].浙江大学学报(工学版),2012,46(9):1660-1665. (ZHOU Hao, RUI Miao, CEN Kefa. Study of flow in porous media by LES-LBM coupling method [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012,46(9):1660-1665. (in Chinese))
- [17] 阎广武.用格子 Boltzmann 方法研究 Burgers 方程[J].力学学报,1999,31(2):143-151. (YAN Guangwu. Studies of Burgers equation using a Lattice Boltzmann method [J]. Acta Mechanica Sinica, 1999,31(2):143-151. (in Chinese))
- [18] Li Q H, Chai Z H, Shi B C. Lattice Boltzmann models for two-dimensional coupled Burgers equations [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2018,75(3):864-875.
- [19] Wolfram S. Cellular automaton fluids 1: basic theory [J]. Journal of Statistical Physics, 1986,45(3-4):471-526.
- [20] 郭照立,郑楚光.格子 Boltzmann 方法的原理及应用[M].北京:科学出版社,2009. (GUO Zhaoli, ZHENG Chuguang. Theory and Applications of Lattice Boltzmann Method [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [21] 刘宁宁. Lattice Boltzmann 方法改进及其在城市雨洪模型中的应用研究[D].南京:河海大学,2012. (LIU Ningning. The Improvement of Lattice Boltzmann Method and Its Applied Research in Urban Storm Water Model [D]. Nanjing: Hohai University, 2012. (in Chinese))
- [22] 张东辉,芮孝芳,马哲树,等.土壤下渗问题的格子玻尔兹曼模拟[J].河海大学学报(自然科学版),2010,38(6):671-676. (ZHANG Donghui, RUI Xiaofang, MA Zheshu, et al. Simulation of soil infiltration process by lattice Boltzmann method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010,38(6):671-676. (in Chinese))

- Management, 2019:1-15.
- [54] Van Loon A F, Van Lanen H A J. Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling framework [J]. *Water Resources Research*, 2013,49(3):1483-1502.
- [55] Liu Y, Ren L, Zhu Y, et al. Evolution of hydrological drought in human disturbed areas: a case study in the Laohahe Catchment, northern China [J]. *Advances in Meteorology*, 2016:1-12.
- [56] Sutanudjaja E H, Van Beek R, Wanders N, et al. PCR-GLOBWB 2: a 5 arcmin global hydrological and water resources model [J]. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2018,11:2429-2453.
- [57] Van Loon A F, Gleeson T, Clark J, et al. Drought in the Anthropocene [J]. *Nature Geoscience*, 2016,9(2):89-91.
- [58] Sheffield J, Wood E F, Roderick M L, et al. Little change in global drought over the past 60 years [J]. *Nature*, 2012,491(7424):435-438.
- [59] Seager R, Hoerling M P, Schubert S D, et al. Causes of the 2011-14 California drought [J]. *Journal of Climate*, 2015,28(18):6997-7024.
- [60] Shih J S, ReVelle C. Water-supply operations during drought: continuous hedging rule [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1994,120(5):613-629.
- [61] Chang J, Guo A, Wang Y, et al. Reservoir operations to mitigate drought effects with a hedging policy triggered by the drought prevention limiting water level [J]. *Water Resources Research*, 2019,55(2):904-922.
- [62] Jin Y, Lee S. Comparative effectiveness of reservoir operation applying hedging rules based on available water and beginning storage to cope with droughts [J]. *Water resources management*, 2019,33(5):1897-1911.
- [63] 曹润祥,李发文,冯平. 基于水库旱限水位动态控制的供水策略研究 [J]. *安全与环境学报*, 2019,19(3):916-922. (CAO Runxiang, LI Fawen, FENG Ping. Water supply strategy based on dynamic control of drought limit water level [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019,19(3):916-922. (in Chinese))

Review of Human Impacts on Formation and Development of Hydrologic Drought

WANG Wen, WANG Jingshu, TAO Yiyuan, CHENG Hui

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Drought becomes a natural and artificial composite hazard rather than a purely natural hazard in the age of Anthropocene that human activities have profound impacts on the earth system. The anthropogenic activities have caused the variation of global or continental meteorological drought characteristics through changing the atmospheric composition (by greenhouse gas emission), which indirectly impact the formation and evolution of hydrological droughts. Besides, it has caused the changes in rainfall-runoff transformation and storage of the river-groundwater system through changing the state of river storage and hydraulic connection (by means of reservoir impoundment, water diversion, and transfer project) and river flows pathways (by means of land use change and various means of water consumption), which directly affects the propagation from meteorological drought to hydrologic drought and the evolution of hydrologic drought. The drought research is an import theme to reveal the impacts of human activities on drought development by taking the complex interactions between natural and social water cycles into account.

Key words: anthropocene; hydrologic drought; meteorological drought; drought propagation; reservoir regulation; water consumption



(上接第 33 页)

Numerical Simulation of Overland Flow by Lattice Boltzmann Method

LIU Zhanjun, LIU Ningning

(Haihe River, Huaihe River and Xiaoqinghe River Basin Water Conservancy Management and Service Center of Shandong Province, Jinan 250100, China)

Abstract: Taking one-dimensional kinematic wave equation as research object, this paper showed the detailed steps applying D1Q5 model on the numerical simulation of one-dimensional overland flow by Lattice Boltzmann, compared calculation results with analytical solutions, and analyzed the influence of intervals and relaxation time on calculation accuracy. The results indicate that the Lattice Boltzmann method could be well applied to the numerical simulation of overland flow. The selection of space interval has a great influence on calculation accuracy. The range of relaxation time should be within [1.0,1.2].

Key words: Lattice Boltzmann method; overland flow; equilibrium distribution function; relaxation time