

推求地面径流单位线的 Free Search 算法

王 斌^{1,2,3}, 黄金柏⁴, 宫兴龙¹, 朱士江⁵, 王贵作⁶

(1.东北农业大学水利与土木工程学院,黑龙江哈尔滨 150030;2.农业部农业水资源高效利用重点实验室,黑龙江哈尔滨 150030;3.黑龙江省粮食产能提升协同创新中心,黑龙江哈尔滨 150030;4.扬州大学水利与能源动力工程学院,江苏扬州 225009;5.三峡大学水利与环境学院,湖北宜昌 443002;6.水利部发展研究中心,北京 100038)

摘 要:地面径流单位线在水文计算和水文预报工作中应用十分普遍,但当净雨时段较多时,传统的单位线推求方法存在工作量大、效率不高、过分依赖专业经验、计算过程复杂、模拟结果可能出现负值等问题。为此,本文引入源于动物群体迁移行为的自由搜索(Free Search, FS)算法,将 FS 单个动物每步探查行走的位置向量作为一条初始单位线,在 FS 算法迭代过程中再将所有的初始单位线转化为符合定义的单位线,从而利用动物群体的迁移行为推求出最优单位线。该方法的优点是概念清晰,操作简便,能够直接给出单位线的各时段流量值。三个典型实例模拟结果表明:利用 FS 推求单位线时,寻优一次即可得到满意结果,所得单位线不需要修正,并且能够有效克服锯齿现象,对地面径流量的模拟精度也较高。

关键词:地面径流单位线;汇流计算;水文预报;自由搜索;优化估计

中图分类号: P333.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0852(2017)01-0008-06

1 引言

流域单位线由坡地单位线与河网单位线组合而成,由于坡地汇流历时较短,一般不单独分析,而用河网单位线代替流域单位线;或利用净雨量和出口断面流量数据,将坡地汇流与河网汇流作为整体分析流域单位线^[1]。在流域汇流计算中,经常采用的单位线是根据水文资料分析的地面径流单位线,是指在给定的流域上,单位时段内时空分布均匀的单位净雨量(一般取 10mm)在出口断面形成的地面(直接)径流过程线^[1-2]。地面径流单位线简明易用,效果较好,在水文计算和水文预报中应用十分普遍,其基本概念和假定对于地下径流单位线、坡地单位线和河网单位线也基本

适用^[1-2]。因此,研究地面径流单位线(下文简称“单位线”)的推求方法,对于解决流域汇流计算问题具有普遍的参考价值。

传统的单位线推求方法主要有缩放法^[3]、图解法^[1]、最小二乘法^[4]、分析法^[2-5]、试错法^[1-3,5]、科林(Collins)迭代法^[5]、目标规划法^[6-7]等。缩放法是最简单的单位线推求方法,如果只有 1 个时段净雨,一般只需将流量过程线分割去除地下径流,即可得到这一时段净雨对应的地面径流过程线,再利用倍比假定缩放该地面径流过程线,便可得到所求单位线^[2-3,5]。对于 2~3 个时段净雨形成的径流较宜采用分析法,虽然该方法较简单,但由于净雨量估算误差、测流误差等原因,所得单位线的后段可能会出现锯齿状甚至负值等不合理现

收稿日期:2016-06-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51009026;41271046);农业部农业水资源高效利用重点实验室开放课题资助项目(2015002);黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12531024)

作者简介:王斌(1976-),男,黑龙江桦南人,副教授,博士,主要从事水文过程模拟及农业节水理论与技术等方面的研究。

E-mail: wangbin@neau.edu.cn

象^[2],一般要以 10mm 水深为控制量修正单位线^[2-5]或采用目标规划^[7]和逆时序倒推^[8]等方法解决锯齿现象以及正负流量交替出现的问题。图解法可以分解多时段净雨形成的地面径流过程,但一般更适于 2~3 个时段的净雨量,当净雨时段较多时工作过于繁杂,一般建议改用试错法^[1]。试错法适用于多时段净雨且有一个时段净雨量最大的情况,采用该方法时,假定单位线不易拟定,试错时人的主观任意性较大,需要调试者具有一定的专业经验,对单位线的修正也不易完美,吻合程度缺乏客观标准,费时费力^[1-3,5]。科林迭代法的计算结果及迭代收敛性与拟定的初始单位线有关,推求成果不一定是最佳结果,当净雨时段较多时往往难以迭代^[1-2]。

总之,上述传统单位线推求方法的共同特点是效率不高,如果涉及数学计算则过程繁杂,不易被一般的工程技术人员掌握,尤其是部分方法仍会出现模拟的流量为负值现象,或者仍需对所得的单位线进行修正。由于流域单位线是多次洪水单位线的综合平均值^[2],当采用上述传统方法获取流域单位线时工作量将会进一步增大。利用单位线开展汇流计算属于“黑箱”方法^[2],该方法不过分强调单位线的物理概念,一旦推求方法过于复杂,单位线便失去了其利用方面的优势。因此,本文将自由搜索(Free Search, FS)算法引入到单位线的推求工作中,以期提供一种不过多依赖专业经验,但效率和精度均较高的单位推求方法。

2 基于 FS 的单位线推求方法

FS 是一种源于动物群体(animals)迁移行为的优化算法^[9],动物群体凭借多次离散运动搜索空间。在搜索过程中,动物个体(animal)采取探查行走的方式,目的是为了发现一个自己偏好的位置,亦即发现了实际优化问题目标函数的一个潜在解,在搜索行为结束时群体找到的最优位置即为目标函数的最优解^[9-11]。

2.1 设置时段数及流量变化区间

利用 FS 推求单位线时,需要向 FS 提供所求单位线的时段数以及单位线各时段的流量变化区间。单位线时段数一般需要满足下式^[4]:

$$n=N-p+1 \quad (1)$$

式中: n 为单位线时段数; N 为流域出口断面流量过程线时段数; p 为净雨时段数。

通常单位线的初、末时段流量为 0,而其它时段流量为正值。由于实测地面径流量为各时段净雨产流量的叠加值,根据倍比假定,当至少有一个时段净雨量大于等于 10mm 时,所求单位线流量的峰值不会超过实测地面径流量的峰值。FS 寻优能力较强,可在较大的流量变化区间内开展搜索活动,利用 FS 推求单位线时:(1) 各时段流量变化区间的左端点值均设为 0;(2) 初、末时段的流量变化区间右端点值也设为 0;(3) 当至少有一个时段净雨量大于等于 10mm 时,取实测地面径流量的峰值作为除去初、末时段后剩余的 $n-2$ 个时段的流量区间右端点值;(4) 当各时段净雨量均小于 10mm 时,可根据倍比假定将实测地面径流量的峰值放大,再作为上述 $n-2$ 个时段的流量区间右端点值。这样处理后,可以保证 FS 在 $n-2$ 个宽泛的流量变化区间内开展搜索活动。

2.2 FS 产生初始单位线

采用 FS 推求单位线时,每个动物一次探查行走的位置向量对应一条初始单位线,该动物的多步探查结果构成了包含多条初始单位线的单位线矩阵:

$$q'_j = \begin{bmatrix} q'_{1j} \\ q'_{2j} \\ \vdots \\ q'_{sj} \end{bmatrix} = (q'_{kij})_{s \times n} = \begin{bmatrix} q'_{11j} & q'_{12j} & \cdots & q'_{1nj} \\ q'_{21j} & q'_{22j} & \cdots & q'_{2nj} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ q'_{s1j} & q'_{s2j} & \cdots & q'_{snj} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: m 为动物群体大小, $j=1,2,\dots,m$; s 为探查步伐数, $k=1,2,\dots,s$; n 为 FS 搜索空间维数(即单位线时段数), $i=1,2,\dots,n$; q'_j 为记录第 j 个动物 s 步探查过程位置的矩阵(即 s 条初始单位线); q'_{kj} 为第 j 个动物第 k 步探查时的位置向量(即第 k 条初始单位线); q'_{kij} 为第 j 个动物第 k 步探查时第 i 维位置分量(即第 k 条初始单位线第 i 时段的流量初始值)。

2.3 初始单位线转换

初始单位线的各时段流量是 FS 在 2.1 中的各区间内寻优得到的数值,其总和在数量上不一定符合单位线定义,即各条初值单位线的流量之和经转换后与 10mm 净雨量不等。为此,采用下式将 FS 产生的各条初始单位线转换为满足流量之和要求的单位线:

$$q_{kij} = \frac{Q_{UH}}{n} q'_{kij} \quad (3)$$

式中: q_{kij} 为单位线第 i 时段的流量值, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $\sum_{i=1}^n q'_{kij}$ 为初始单位线的流量累加值, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; Q_{UH} 为所求单位线的流量累加值, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

$$Q_{UH} = \frac{10F}{3.6\Delta t} = \frac{10 \sum_{l=1}^N Q_{obs,l}}{\sum_{t=1}^p h_t} \quad (4)$$

式中: F 为流域面积, km^2 ; Δt 为时段长, h ; $Q_{obs,l}$ 为出口断面第 l 时段的地面径流量实测值, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; p 为净雨时段数, $t=1, 2, \dots, p$; h_t 为第 t 时段的平均净雨量, mm 。

一般情况下, 对实测的降雨径流数据和研究流域的汇流特征稍加分析, 即可确定单位线峰值的出现时段^[6]; 在单位线峰值两侧, 各时段的流量通常呈现先增大再减小的趋势。为避免单位线纵标出现锯齿现象, 另外编制了单位线流量排序程序, 对于满足式(3)的单位线, 先将其最大流量排序在峰值所在的时段, 再以该峰值为界, 在峰值的两侧按先增大、后减小的顺序排列其他流量值。

经过式(3)转换以及其后的排序后, 每个动物探查到的满足定义的单位线矩阵如下:

$$q_j = \begin{bmatrix} q_{1j} \\ q_{2j} \\ \vdots \\ q_{sj} \end{bmatrix} = (q_{kij})_{s \times n} = \begin{bmatrix} q_{11j} & q_{12j} & \cdots & q_{1nj} \\ q_{21j} & q_{22j} & \cdots & q_{2nj} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ q_{s1j} & q_{s2j} & \cdots & q_{snj} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.4 FS 推求最优单位线

寻优目标是使得利用单位线模拟的地面径流量与实测地面径流量之间的残差平方和最小, 目标函数见式(6)。在算法迭代过程中, FS 中的每个动物均会以式(2)~(5)为计算基础, 通过探查运动和修改策略不断更新自己的位置, 连续产生式(2)的初始单位线矩阵与符合单位线定义的式(5)单位线矩阵, 并将式(5)矩阵中的每条单位线带入式(6), 从而推求出一条最优的单位线。

$$\min f(q_{kij}) = \sum_{l=1}^N (Q_{obs,l} - Q_{sim,l})^2 = \sum_{l=1}^N [Q_{obs,l} - \sum_{i=1}^p h_i q_{kij-t+1}]^2 \quad (6)$$

式中: $Q_{sim,l}$ 为利用 FS 推求的单位线模拟的出口断面第 l 时段地面径流量值, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

FS 自动判断是否满足设定的终止条件, 如果满足

则说明算法已经搜索到可以接受的最优解, 如不满足则继续探查搜索。由上述可见, 利用 FS 推求单位线的方法概念清晰, 能够直接给出单位线各时段的流量值, 是多维优化问题, 寻优维数与单位线时段数相同, 采用常规的优化方法处理较困难, 而利用 FS 则非常简便。FS 的详细算法可参见文献[10-12]。

3 应用实例

由于推求 1 个时段净雨量的单位线较简单, 本文主要针对分析法、试错法、响应函数法等常见单位线推求方法, 选取多时段净雨的单位线推求实例, 引入 FS 解决单位线推求过程中易出现的锯齿、负值等问题, 并验证 FS 算法推求单位线时高效、便捷、精度高等优势。实例中涉及的流域面积、时段间隔、净雨量、实测地面径流量等数据均来自文献, 为便于读者验证, 各实例中 FS 推求的单位线及其模拟的流量结果均保留到小数点后四位。

3.1 实例一

罗定江古榄站 1972 年 11 月的一次净雨及其产生的地面径流过程见表 1^[8], 虽然只有两个时段的净雨, 但采用分析法按顺时程分割各时段的径流量时, 在第 5 时段后将出现负值, 且锯齿现象特别严重。叶林泉(2003)的研究表明, 当 $h_2/h_1 < 1$ 时可按顺时序分割, $h_2/h_1 > 1$ 时则可改用逆时序分割, 这样能够保证误差是收敛的, 从而克服流量出现负值而无法继续分割的困难^[8], 苏静等(2008)的研究也证实了这种方法的有效性^[13], 但采用逆时序倒推方法分割地面径流后, 虽然时段净雨产生的地面径流量没出现负值, 转换的单位线也比较合理, 但仍需修正所得的单位线^[8]。采用 FS 推求本例单位线时, 2 个时段的净雨总量为 105.6mm , 实测地面径流量之和为 $4577 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 因此, $Q_{UH} = 433.4 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $n=10$, 各时段的流量变化区间分别设为 $[0, 0]$ 、 $[0, 1803]$ 、 \dots 、 $[0, 1803]$ 、 $[0, 0]$, 单位线在第 3 时段出现峰值。采用逆时序分割法和 FS 算法推求的单位线及其模拟结果见表 1。利用文献[8]单位线模拟的残差平方和为 21 566, 而利用 FS 推求的单位线模拟的残差平方和为 13 238, 精度有所提高, 且寻优一次即可得到满意的单位线, 也不需再进行修正, 很好地克服了锯齿现象。

表1 罗定江古榄站单位线推求计算表
Table1 The unit hydrograph evaluation at the Gulan station on the Luodingjiang River

时段 ($\Delta t=6h$)	实测地面径流量 $/m^3 \cdot s^{-1}$	时段净雨量/mm	36.7mm 净雨产生的地面径流量 $/m^3 \cdot s^{-1}$	68.9mm 净雨产生的地面径流量 $/m^3 \cdot s^{-1}$	文献[8]推求的单位线 $/m^3 \cdot s^{-1}$	文献[8]单位线模拟的地面径流量 $/m^3 \cdot s^{-1}$	FS 推求的单位线 $/m^3 \cdot s^{-1}$	FS 单位线模拟的地面径流量 $/m^3 \cdot s^{-1}$
1	0	36.7	0.0		0.0	0.0	0.0000	0.0000
2	65	68.9	65.0	0.0	52.9	194.1	42.6758	156.6203
3	1 002		880.0	122.0	166.9	977.0	176.5587	942.0069
4	1 803		151.0	1 652.0	164.0	1751.8	165.6153	1 824.2975
5	1 245		961.6	283.4	20.5	1205.2	22.1044	1 222.2127
6	196		-1609.3	1 805.3	13.3	190.1	12.2938	197.4179
7	125		3146.2	-3 021.2	8.0	121.0	7.9078	113.7261
8	75		-5831.7	5 906.7	4.8	72.7	4.2352	70.0279
9	45		10 993.3	-10 948.3	2.9	43.7	2.0370	36.6560
10	21		-2 0617.7	20 638.7	0.0	20.0	0.0000	14.0348
11	0		3 8707.4	-38 707.4		0.0		0.0000

3.2 实例二

南河开峰峪站 71503 号洪水由 5 个时段的净雨产生,净雨量及其地面径流量见表 2^[1-2]。多时段净雨形成的洪水通常是预报的对象,但由于净雨时段较多,采用试错法分解流量时工作量很大,精度也难于保证,最后的试算结果仍需调整^[1-2]。采用 FS 推求本例单位线时,5 个时段的净雨总量为 31.8mm, 实测地面径流量

之和为 $7\ 718m^3 \cdot s^{-1}$, 因此, $Q_{UH}=2427.0m^3 \cdot s^{-1}; n=14$, 各时段的流量变化区间分别为 $[0, 0]$ 、 $[0, 1970]$ 、……、 $[0, 1970]$ 、 $[0, 0]$, 与文献[1-2]不同,FS 推求的单位线在第 2 时段出现峰值。利用文献推求的单位线模拟的地面径流量结果见表 2, 模拟的流量残差平方和为 939021;利用 FS 寻优一次即可得到满意的单位线,利用该单位线模拟的残差平方和为 6 012,精度得到很大提高。

表2 南河开峰峪站单位线推求计算表
Table2 The unit hydrograph evaluation at the Kaifengyu station on the Nanhe River

时段 ($\Delta t=6h$)	实测地面径流量 $/m^3 \cdot s^{-1}$	时段净雨量/mm	文献[1-2]推求的单位线 $/m^3 \cdot s^{-1}$	文献[1-2]单位线模拟的地面径流量 $/m^3 \cdot s^{-1}$	FS 推求的单位线 $/m^3 \cdot s^{-1}$	FS 单位线模拟的地面径流量 $/m^3 \cdot s^{-1}$
1		1.8				
2	0	10.3	0	0	0.0000	0.0000
3	230	14.7	380	68	984.9563	177.2921
4	1120	3.4	1000	571	501.0195	1104.6885
5	1970	1.6	340	1650	219.4178	2003.4311
6	1340		190	1984	180.6275	1329.8971
7	848		140	1122	157.0062	864.7912
8	600		110	719	107.1936	601.2988
9	440		90	454	72.1737	450.7200
10	320		70	345	59.5036	324.9067
11	230		50	273	49.1902	237.8051
12	180		30	208	36.9247	186.4727
13	140		20	146	29.5648	147.4427
14	110		10	95	29.4661	116.2802
15	80		0	58	0.0000	94.2352
16	50			26		59.2752
17	40			7		14.7488
18	20			2		4.7146
19	0			0		0.0000

3.3 实例三

汉江洵河向家坪站以上集水区面积为6 448 km², 1956年的一次地面流量过程见表3, 葛守西(1999)采用21种响应函数离线识别算法对该次洪水进行了模拟^[14]。该实例虽与实例二的净雨时段数相同, 但由于本例中实测地面径流量时段数较大, 如采用试算法工作量很大。选取本例不仅可以进一步验证FS在推求多时段净雨形成的多时段单位线的优势, 也便于和文献[14]中诸多算法计算结果进行对比。在本例中, 5个时段的净雨总量为33.1mm, 实测地面径流量和为19 540 m³·s⁻¹, 因此, $Q_{UH}=5 903.3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; 但如按流域面积和时段间隔($\Delta t=3 \text{ h}$ ^[15])核算, $Q_{UH}=5 970.4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。利用FS推求单位线时取 $Q_{UH}=5 903.3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 单位线时段数 $n=28$, 假设本例中实测地面径流量的最大值 $3 000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 仅由7.1mm净雨产生, 依据倍比假定可推断本例所求单位线的时段最大流量不会超过 $4 225 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 因此各时段的流量变化区间分别设为 $[0, 0]$ 、 $[0, 4225]$ 、……、 $[0, 4225]$ 、 $[0, 0]$, 单位线在第4时段出现峰值。FS寻优得到的单位线及其模拟的地面径流量结果见表3。

在文献[14]介绍的21种算法中, 有12种算法在模拟地面径流量时出现了负值。利用FS推求的单位线模拟流量均为正值, 模拟的流量残差平方和为149 197。与文献[14]模拟流量不出现负值的9种算法相比, FS推求的单位线模拟流量的效果不如二约束最小二乘法(流量残差平方和45 551)、二约束 δ -样条函数逼近法(流量残差平方和47 180), 但好于其他7种算法, 且实现过程十分简便。

4 结论

针对地面径流单位线传统推求方法工作量大、效率不高、过分依赖专业经验、计算过程复杂、模拟结果可能出现负值等问题, 以三个实例的多时段净雨单位线推求为例, 验证了基于FS的单位线推求方法的适用性, 得到结论如下:

(1) 采用FS寻优一次即可直接获得满意的单位线, 所得到的单位线也不需再进行修正, 能够很好克服单位线的锯齿现象。

(2) 采用FS推求多时段的单位线时, FS产生流量及其对流量的修正、排序等工作内容均按程序流程进

表3 洵河向家坪站单位线推求计算表
Table3 The unit hydrograph evaluation at the Xiangjiaping station on the Xunhe River

时段 ($\Delta t=3 \text{ h}$)	实测地面径 流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	时段净雨量 /mm	FS推求的单 位线/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	FS单位线模拟 的地面径流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
1		7.1		
2		7.9		
3	0	8.6	0.0000	0.0000
4	44	7.3	0.5239	0.3720
5	380	2.2	784.7100	557.5580
6	1667		1554.9000	1724.3504
7	2790		974.7200	2595.6552
8	3000		333.7300	2917.1447
9	2420		333.6000	2646.4751
10	1810		333.5900	1841.0243
11	1355		333.3500	1245.1719
12	1070		225.4300	1027.2378
13	860		146.3700	885.6061
14	710		146.0100	729.9045
15	589		145.7900	582.6379
16	498		120.5500	482.7779
17	421		85.9200	420.4058
18	358		74.8850	363.2671
19	302		62.1690	297.2656
20	249		54.6290	241.5438
21	205		41.9840	199.9993
22	173		38.8770	169.6090
23	143		26.1160	138.9178
24	117		24.2580	113.9557
25	90		16.5370	90.9815
26	69		15.2800	72.3925
27	53		12.7340	58.7880
28	51		12.6870	49.6172
29	40		3.9991	38.6059
30	32		0.0000	26.7275
31	22			15.5022
32	12			5.7105
33	7			0.8798
34	3			0.0000

行, 不存在人为因素的干扰; 不需要复杂的数学知识, 不依赖操作人员的专业经验, 不用反复试错, 不会因为单位线时段数的增大而使得应用工作变得更加复杂。

(3) 与分析法、对比法、响应函数离线识别算法等相比, 利用FS推求的单位线模拟的地面径流量不存在负值, 且模拟精度较高, 部分实例的模拟精度获得较大幅度的提升。

参考文献:

- [1] 长江流域规划办公室. 水文预报方法[M]. 北京: 水利电力出版社, 1979. (Yangtze River Basin Planning Office. Hydrological Forecasting Method [M]. Beijing: China Water Conservancy and Electric Power Press, 1979. (in Chinese))
- [2] 长江水利委员会. 水文预报方法(第二版)[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1993. (Yangtze River Water Resources Commission. Hydrological Forecasting Method (2nd Edition)[M]. Beijing: China

- Water Conservancy and Electric Power Press, 1993. (in Chinese))
- [3] 叶守泽. 水文水利计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (YE Shouze. Hydrological and Hydraulic Calculation [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2003. (in Chinese))
- [4] 詹道江,叶守泽. 工程水文学(第三版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社,2000.(ZHAN Daohong, YE Shouze. Engineering Hydrology(3rd Edition) [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2000. (in Chinese))
- [5] 包为民. 水文预报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (BAO Weimin. Hydrological Forecasting [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2009. (in Chinese))
- [6] 方红远,孙建峰. 推求水文单位线的优化计算法[J]. 水电能源科学, 2003,21(3):14-16.(FANG Hongyuan, SUN Jianfeng. Optimization method for calculating composite unit hydrograph[J]. Water Resources and Power, 2003,21(3):14-16. (in Chinese))
- [7] 董晓华,赵云发,袁杰,等. 基于目标规划法的时段单位线多目标优化估计[J]. 人民长江, 2007,38(8):12-13. (DONG Xiaohua, ZHAO Yunfa, YUAN Jie, et al. Multi-objective optimization of unit hydrograph estimation based on goal programming[J]. Yangtze River, 2007,38(8): 12-13. (in Chinese))
- [8] 叶林泉. 经验单位线分析方法的改进[J].中国农村水利水电,2003,(6): 53-54.(YE Linquan. An improvement method of analysis unit hydrograph [J]. China Rural Water and Hydropower, 2003,(6):53-54. (in Chinese))
- [9] Kalin Penev, Guy Littlefair. Free search: a comparative analysis[J]. Information Sciences, 2005,172:173-193.
- [10] 王斌,张展羽,张国华,等.一种新的优化灌溉制度算法—自由搜索[J]. 水科学进展, 2008,19(5):736-741. (WANG Bin, ZHANG Zhanyu, ZHANG Guohua, et al. Free search: a novel algorithm for optimizing irrigation schedule [J]. Advances in Water Science, 2008,19(5): 736-741. (in Chinese))
- [11] 王斌,张展羽,张国华,等. 基于自由搜索的灌区优化配水模型研究[J]. 水利学报, 2008,39(11):239-1243.(WANG Bin, ZHANG Zhanyu, ZHANG Guohua, et al. Optimized water rationing model based on free search for irrigation district[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,39(11):1239-1243. (in Chinese))
- [12] 王斌,黄金柏,宫兴龙,等. Free Search 率定的 Sacramento 模型在东北寒旱区的应用 [J]. 农业机械学报, 2016,(6):171-177.(WANG Bin, HUANG Jinbai, GONG Xinglong, et al. Application of Sacramento model calibrated by free search at the cold and arid region of northeast China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,(6):171-177. (in Chinese))
- [13] 苏静,董晓华,谭雪松. 地面径流计算误差对单位线推求的影响及对策 [J]. 中国农村水利水电, 2008,(5):5-7.(SU Jing, DONG Xiaohua, TAN Xuesong. Propagation and remedy of surface runoff error in deriving the T-hour unit hydrographs [J]. China Rural Water and Hydropower, 2008,(5):5-7. (in Chinese))
- [14] 葛守西. 现代洪水预报技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.(GE Shouxi. Technology in Modern Flood Forecast [M]. Beijing: China WaterPower Press, 1999. (in Chinese))
- [15] 葛守西. 线性水文系统差分模型识别方法及其在汇流计算上的应用[J]. 水利学报, 1982,(8):13-23.(GE Shouxi. The identification methods of difference model in linear hydrologic systems and their applications in computation of flow concentration [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1982,(8):13-23. (in Chinese))

Estimating Surface Runoff Unit Hydrograph by Free Search

WANG Bin^{1,2,3}, HUANG Jinbai⁴, GONG Xinglong¹, ZHU Shijiang⁵, WANG Guizuo⁶

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China; 3. Grain Production Capacity Collaborative Innovation Center of Heilongjiang Province, Harbin 150030, China; 4. College of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 5. College of Hydraulic and Environmental Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 6. Development Research Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: Unit hydrograph of surface runoff is widely used in hydrological calculation and forecast. However, when the net rainfall with multi-intervals appear, some advantages exist in the traditional approach of unit hydrograph method such as heavy, inefficient, complex, and the simulation results may be negative. In this paper, Free Search (FS), derived from the animal group migration behavior, was used as a method for estimating surface runoff unit hydrograph. The position vector of each exploratory step for the individual animal of FS was ascertained as an initial unit hydrograph. All the initial unit hydrographs were converted into the standard unit hydrographs in the iterative process of FS, and the optimal unit hydrograph was eventually ascertained from the animal group migration. FS exhibits the advantages of the clear concept and simple operation, and the flow discharge of each time interval can be given directly. The simulation results for three cases show that the satisfactory results could be achieved by FS for optimizing the unit hydrograph once; the unit hydrograph without negative and need not to be fixed; the fluctuation in the results was effectively avoided; and surface runoff simulation exhibits relatively high precision.

Key words: surface runoff unit hydrograph; flow concentration calculation; hydrological forecasting; free search; optimal estimation