

多沙河流次洪横断面冲淤面积随机预估

王凤龙, 秦毅, 张晓芳, 韩海军, 颜恒

(西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048)

摘要:提出一种通过预测多沙河流横向变化预估河段冲淤的方法。通过追踪多沙河流次洪过程中横断面面积变化, 及分析多沙河流次洪横断面面积变化成因, 建立了横断面冲淤变化模型。利用此模型并结合蒙特卡洛方法, 实现了给定水沙条件下, 对次洪冲淤导致的横断面面积变化的预估。经用于黄河内蒙古河段实例分析, 假设洪水冲刷内蒙古河道, 上游巴彦高勒、三湖河口断面分别扩大 $286, 283 \text{ m}^3$, 下游头道拐断面几乎没变; 用输沙平衡法计算结果上游巴—三河段冲刷 121 万 t, 下游三一河段冲刷 35 万 t, 表明该方法实用、可行。可以为多沙河流的河道治理、防灾减灾决策提供了技术支撑, 并丰富了多沙河流冲淤计算方法。

关键词:多沙河流; 次洪; 横断面冲淤变化量; 随机预估

中图分类号: P332.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)04-0183-05

Random Prediction of Scouring and Silting Change on Cross Section of Sediment-laden River During once Flood

WANG Feng-long, QIN Yi, Zhang Xiao-fang, HAN Hai-jun, YAN Heng

(Key Laboratory Northwest Water Resource Environment and Ecology, Ministry of Education, Xi'an 710048, China)

Abstract: The paper proposed a method about scouring and silting change amount on cross section by forecasting section change about scouring and silting with sediment-laden river cross section change during once flood and analyzing the causes. Combination of the model with monte carlo method realized the random prediction on fixed water and sediment condition. Taking inner Mongolia Reach for example, assumed flooding reach, Bayabgaole and Sanhuhekou section respectively enlarge $286, 283 \text{ m}^3$; Toudaoguai section change very little. Balance of carrying sediment results show that upper more and down less. Technical support was provided for river controlling policy, disaster prevention and reduction and enrich methods of scouring and silting change amount on sediment-laden river.

Key words: sediment-laden river; once flood; scouring and silting change on cross section; random prediction

天然状态下的多沙河流为适应来水来沙条件, 河槽游走摆动, 能够维持河流的冲淤平衡。然而人类活动的不断加重, 阻碍了河流的健康发展。一系列水利工程的修建运行, 工农业的大量引用水, 在带来了颇丰的经济效益的同时, 河流的健康环境受到逐步的破坏。对于多沙河流而言, 输沙水量的不足影响重大, 大量泥沙不能输送出河道从而淤积在某一河段造成难以治理的灾害, 比如三门峡的运行导致潼关高程居高不下; 黄河内蒙古河道淤积加重^[1], 凌汛期灾害不断。我们不但要认识到灾害治理的重要性, 还要尽量对治理措施的实施进行全面分析评估, 完善防治措施。这样, 才能更好的为将来人类活动结果做出预测

评估, 更好的为维护河流健康服务。对于多沙河流来说, 河道冲淤预估在河流管理、防洪减灾方面占有至关重要的地位。

目前对多沙河流冲淤进行预估主要有纵横两个方向的探讨。纵向冲淤是用水位流量关系判断, 用输沙平衡法、断面法分析计算河道冲淤量, 比较成熟。横向断面冲淤变化量只能根据实测大断面资料分析得出, 所以尚不能解决次洪过程中不同时刻或一次洪水冲淤引起的面积变化值。另外现有大多数泥沙数学模型^[2]仅能模拟河床纵向变形过程, 横向变形模拟则只能根据冲淤量平铺来反映河床的横向面积变化值。这里提出一种解决给定水沙条件下横断面冲淤

收稿日期: 2009-11-23

作者简介: 王凤龙(1984—), 男, 黑龙江省五常市人, 硕士研究生, 研究方向为干旱区水文水资源。E-mail: wangfenglong2008@yahoo.com.cn

通信作者: 秦毅(1959—), 女, 江苏常州市人, 教授, 研究方向为水文资源、河流泥沙。E-mail: qinyi2@xaut.edu.cn

变化值得预估方法。首先,量化洪水过程中冲淤引起的横断面面积变化;其次,根据影响横断面变化的因子,建立模型;最后,利用模型并考虑因子的不确定性,结合蒙特卡洛方法^[4]进行概率预估。

1 横断面冲淤面积量化表达

1.1 方法

冲积河流的河槽横断面会随着流量的变化而变化,洪水过程中变化更为剧烈,变化的面积主要由两部分组成,分别为水位变化所引起的面积变化与河槽冲淤引起的面积变化。

设某时刻 t_1 的河槽横断面面积为 A_0 ,水位为 Z_0 ,水面宽为 B_0 ,到 t_2 时刻,相应各个量变化为 A'_0, Z'_0, B'_0 (见图 1)。由图 1 可知河槽冲淤变化后的断面面积为:

$$A'_0 = A_1 + (A_2 + A_0) \tag{1}$$

式中: A_1 ——由于流量增加,引发水位变化造成的面积变化; A_2 ——由于河槽被冲刷引起的变化,即河槽冲淤变化。鉴于洪水观测的水文规范要求,两测次水文观测时间的间隔不会相差很大,一般洪水时河槽横断面形态不会发生大的变化,所以可用梯形面积法近似计算 A_1 。

$$A_1 = (B_0 + B'_0)(Z'_0 - Z_0)/2 \tag{2}$$

则冲淤面积 A_2 为:

$$A_2 = A'_0 - A_0 - A_1 \tag{3}$$

表 1 不同河段、不同站断面面积变化

年份	站名	期间最高水位/m	实测大断面面积/m ²				面积差值/m ²	A ₂ 累计值/m ²	误差/%
			起日期 (月-日)	最高水位下 面积/m ²	止日期 (月-日)	最高水位下 面积/m ²			
1985	高村	63.33	05-14	8290	10-17	8971	681	659	3.23
1978	华县	338.8	06-17	1549	11-21	1451	-98	-90	8.16
1990	三湖河口	1018.55	05-07	1025	08-02	1172	147	154	-4.76
2000	头道拐	987.23	07-06	725	09-17	746	22	24	-9.09

从表 1 可以看出,无论是黄河下游,黄河内蒙古河段,黄河支流渭河,在汛期由于冲淤变化引起的断面面积变化均可用 A_2 量化,计算累积值 $\sum_{i=1}^T(A_2)$ 与实测大断面测量值相吻合,最大误差为-9.09%,最小误差为 3.23%,说明该计算结果可靠。

2 模型建立与预测

2.1 因子选取

多沙河流洪水过程中横断面面积时刻的发生冲淤变化,洪水过后断面面积扩大或缩小直接影响河道的过流能力。然而影响断面面积的变化因素众多,根据和流动力学理论,总结为以下几个主要因素。

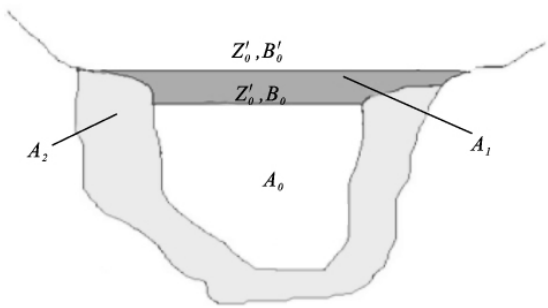


图 1 横断面冲淤变化示意图

以 A'_0 作为 t_3 时刻的起始断面面积,同样方法可计算出 $t_2 - t_3$ 时段产生的冲淤面积。依次类推,可计算洪水过程中冲淤面积的大小。这样就可以探明洪水过程中冲淤的发展变化过程。若将式(3)逐时计算的结果进行累加,即可得到本次洪水过程由于冲淤引起的断面面积变化值 $\sum_{i=1}^T(A_2)$ 。从而解决了洪水过程中横断面面积变化值的问题。

1.2 方法验证

黄河下游、黄河内蒙古河段与渭河均属于冲积河流,但黄河下游与渭河泥沙粒径较细,经常遭遇高含沙小洪水,发生贴边淤积^[4];黄河内蒙古河段泥沙粒径比较粗,常年含沙量不大,近期淤积严重。

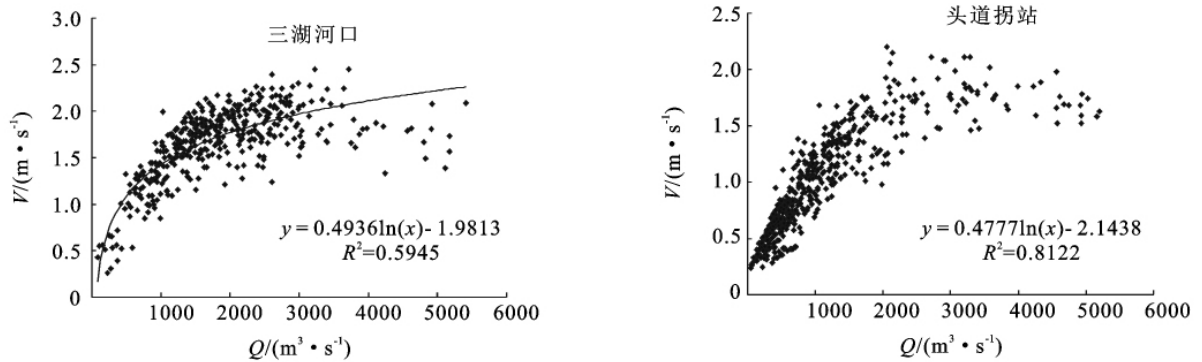
因每个河段有其自己特点,所以选取这些河段上的代表断面资料对上述 A_2 计算方法进行验证,其结果列于表 1。 A_2 累计值计算是按照上面方法,利用起日期到终止日期实测流量成果表资料逐时计算所得。

(1)洪水动能。水量、流量和历时 3 个因子均反映在水流动能上,具体就某一断面而言,泥沙的输移强度主要取决于水流动能的大小,即

$$E = \frac{1}{2} M v^2 \tag{4}$$

式中: E ——水体的动能; M ——流体的质量; v ——流体平均流速(m/s)。单位时间内流体的质量 M 与流量 Q 成正比,实测资料分析流速 v 与 $\ln Q$ 成线性一次正比关系(见图 2),可将整场洪水的动能表示如下:将洪水化为 n 段,每段流量、时间分别为 Q_i, t_i, ρ 为清水密度。

$$E_T \approx \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \rho Q_i t_i [\ln(Q_i)]^2 \tag{5}$$

图2 三湖河口、头道拐站多年 $Q-V$ 关系

(2)峰型系数。多沙河段天然洪水涨退有陡有缓,峰值有大有小。陡涨陡落洪水使得粗颗粒泥沙涨水阶段大量起动,退水阶段又大量的淤积下来,同时该类型洪水极易造成塌岸。以上现象均是造成断面变化的重要原因。这里定义峰型系数为: $Q_{\text{峰}}/\bar{Q}$, $Q_{\text{峰}}$ 、 \bar{Q} 分别为此次洪水的洪峰流量、平均流量。

(3)来沙系数。来沙系数既可以反映水流对泥沙所做的功,又可以反映水沙搭配条件,更重要的是它可以作为河道冲淤变化的判数。定义为: S/Q , S 、 Q 分别洪水过程上站平均含沙量,平均流量。

(4)河相系数。断面河相系数定义为: \sqrt{B}/H , 其中, B 、 H 分别为洪水前期水面宽、平均水深。该值越大,河道越宽浅,相反则窄深。众所周知,窄深河道利于输沙,而宽浅河道则不利。

(5)初始断面面积。对于冲积性河床而言,针对不同的来水来沙和边界条件,河流可以作出相应的调整。对于一场洪水来说,在断面形态变化不大的情况下,对应同流量下,若开始断面面积越大,经过该断面的水流流速也就越小。相反流速则大。

2.2 预测

可采用多元回归,神经网络,支持向量机等多种方法建立洪水冲淤导致的横断面面积变化 $\sum_{i=1}^T (A_2)_i$ 与影响因子关系, $y = \sum_{i=1}^T (A_2)_i = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, (n 为因子个数)即模型。在多沙河流横断面变化预估计算中,未来的水沙条件,河槽边界条件等因子并不是确定值,但是鉴于近些年情况,可推测出未来一段时间每个因子均可认为在一个合理变化范围内取值。这样,就会面对选取合适值计算的问题;当多个因子具有不确定取值的时候,还会面对不同因子的组合选取问题。以往通常使用该因子分布的数学期望作为因子值,但是数学期望仅仅只能给出一个点的计算值,并不能确定是否是最合适值。这里为了充分考虑因子的不确定性,利用蒙特卡洛统计概率方法计算,对该模型中取值不确定性因子分别生成 N 个随

机数,对多个随机性因子的随机数进行组合,得到所有组合数 N ,同时通过模型计算不同组合,可得到 N 个预估值,利用统计方法得到某一预估值 y_i 的发生次数 n_i ,从而得到在 N 个数据中,该预估值 y_i 的发生概率为 n_i/N ,从而得到概率最大处的值。

3 模型应用

该模型能够预估天然河流中由洪水冲淤导致的横断面面积变化。此预估在防洪减灾、河道整治中有着指导意义。譬如在天然洪水来临之前,若能预测未来发生的水沙条件,并对此洪水冲淤带来的影响进行预估,就可提前做好防御工作。在淤积严重河段,采取洪水冲刷等减缓淤积,并做出防洪准备。若能预估出人造洪水将导致的横断面面积变化,就可提前预见横断面上的冲刷效果,为水库的调水调沙提供决策依据。内蒙古河段近期淤积严重,模仿小浪底洪水冲刷河槽是一种方法,下面以内蒙古虚拟洪水冲刷为例简述模型应用。

3.1 概况

黄河内蒙古河段位于黄河上游,重要水文站依次为石嘴山、巴彦高勒、三湖河口和头道拐。内蒙河段自石嘴山至河曲长 780 km。河段区域属暖温带半干旱草原带,年均降水量 150~400 mm,降雨年际变化大,年内分布不均,洪水以上游干流为主^[5],区间支流洪量不大,历时短且陡涨陡落,泥沙主要来自区间的沿岸沙漠风成沙与十大孔兑,粒径较粗,头道拐站多年平均输沙量约 1.5 亿 t。黄河内蒙古段是典型的多沙冲淤河段^[6],并且河道泥沙有其自己特点,颗粒比较粗,由于近些年水沙搭配的不协调,直接影响河道泥沙输送,间接导致近年来河道淤积严重,洪水灾害频繁,尤其是凌汛期。为了能够恢复内蒙古河段的过流能力,保护内蒙古河段安全渡汛。仿照黄河下游小浪底水库利用人造洪水冲刷^[7]下游也是一种值得考虑的方法。根据内蒙古河段历年冲淤规律,虚拟洪水采用内蒙河段历史多年平滩流量值,头道拐站 2 000

m³/s,在假定的虚拟洪水条件下,考虑虚拟洪水沿程衰减特点,参考黄委会水文局所做的黄河上游洪水预报方案^[9],三湖河口站与巴彦高勒站分别为 2 250 m³/s 和 2 400 m³/s,参考小浪底水库调水调沙操作历时,即假定虚拟洪水时间为 10 d。

使用上面所述次洪横断面冲淤面积随机预估方法进行虚拟洪水冲刷效果预估。巴彦高勒、三湖河口与头道拐断面属于内蒙古河段比较有代表性的断面,通过分析这 3 个水文站断面在虚拟洪水过后断面面积的变化值来对冲刷效果进行预估。为了能够筛选因子,采用逐步回归方法^[8]建立模型如下:

巴彦高勒断面:

ΣA₂=1.765×E-0.589A₀+557.5 (6)

三湖河口断面:

ΣA₂=-46.306× $\frac{\sqrt{B}}{H}$ +0.499E-0.557A₀+833.1 (7)

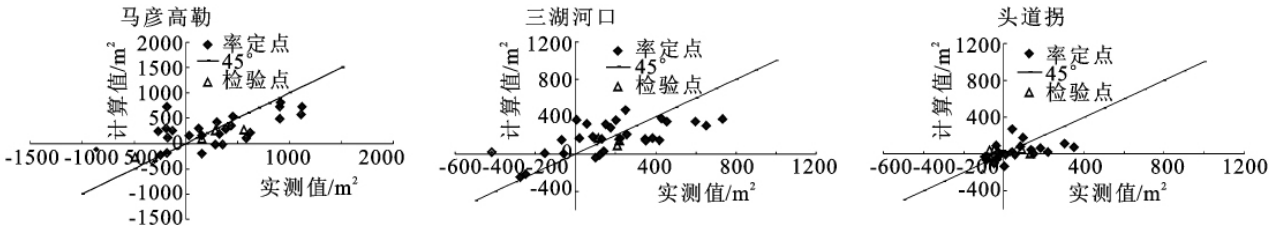


图 3 巴彦高勒站、三湖河口站与头道拐站面积实测值与计算值

3.2 虚拟洪水现状冲刷预测

利用公式(6)–(8)进行预估时,首先要确定的是公式中各个自变量的值。由于 1986 年龙、刘两库联合运行,初期河道为适应新的来水来沙条件不断的自动调整,10 多年后,使断面边界条件发生了很大变化。

鉴于巴彦高勒与头道拐站只有两个显著影响因子,虚拟洪水动能是个确定值,只有前期断面面积一个变化值;使用 2000 年以来汛期河道 500 m³/s 流量情况下平均断面面积代入计算断面面积平均变化情况,用公式(6)、(8)计算,结果见表 2。三湖河口站涉

头道拐断面:

ΣA₂=0.423E-0.361A₀+190.2 (8)

式中:ΣA₂——本站洪水过程中断面面积变化值(m²); $\frac{\sqrt{B}}{H}$ ——本站初始断面形态;E——本站洪水动能;A₀——本站初始断面面积 m²。

通过前面率定的公式计算值与通过实测资料得到的实测值比较,三个站的相关系数为分别为 0.606, 0.671 和 0.605。河槽的冲刷和塌岸(也是造成横断面变形的原因)还均与土力学等因子有关,这里仅仅选取了水力学因子,所以相关系数不高。从图 3 可以看出率定参数所用点、检验点的计算值与实测值均分布在 45°线左右,可以确定以上所选因子及模型形式合理。根据所选因子得到的计算值能近似说明断面面积的变化。

及到 3 个显著影响因子,除了洪水动能这个确定因子,前期河相系数与断面面积均是不确定因子,所以,ΣA₂的一部分是两个随机不确定的组合,根据上述原理,用蒙特卡洛方法,以概率的形式给出 ΣA₂ 估计。图 4 指出,最大概率的面积变化为 174~392 m²,由此而增加的过流能力见表 2

从表 2 可以看出,上游冲刷较多,下游冲刷较少。巴彦高勒、三湖河口站断面均一定程度的扩大,过流能力得到增强;然而头道拐站断面略微缩小。说明在这样的水沙条件下,三一头河段的淤积风险没有得到改善。

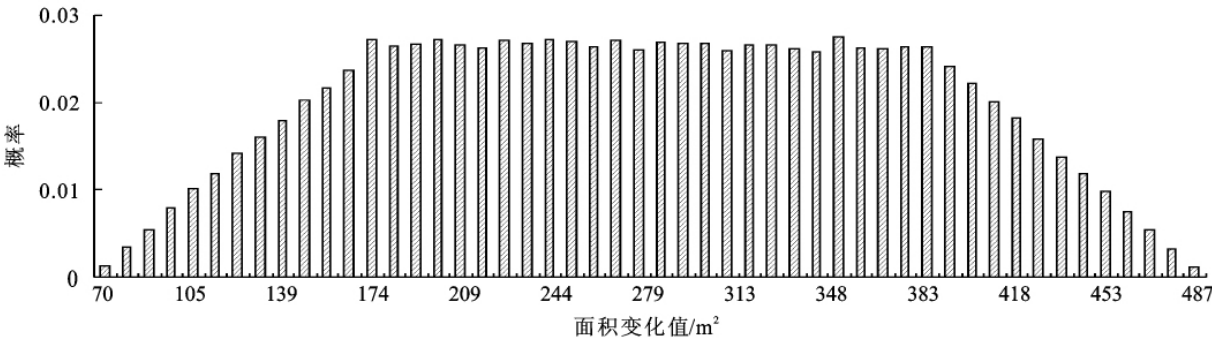


图 4 蒙特卡洛法模拟三湖河口站概率柱状图

表 2 各站影响因子及其虚拟洪水冲刷效果

断面	影响因素				横断面冲刷效果			输沙平衡法 计算(万 t) ‘—’为冲
	平均流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	历时/d	河相系数	初始断面 面积/m ²	ΣA ₂ / m ²	流量 2000 m ³ / s 下的流速/ (m·s ⁻¹)	增加流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	
巴彦高勒	2400	10	—	[500,800]	286	1.3~1.7	371~486	巴—三河段:
三湖河口	2250	10	[3,10]	[400,600]	174~392*	1.5~2.0	(261~588) _{v=1.5} (348~784) _{v=2.0}	—121
头道拐	2000	10	—	[550,700]	—15	1.5~1.8	—22~—26	三—头河段: —35

注:“*”三湖河口站冲淤面积值的发生概率为 69.3%。均值为 283 m²。

3.3 合理性分析

对于以上方法的合理性分析,采用传统的输沙平衡法进行比较。利用黄科院张晓华^[9]分析的宁蒙河段各站输沙率变化规律,分别建立了主要水文站输沙率与流量、上站(上游干流水文站+支流)的含沙量相关关系:

巴彦高勒站:

$$Q_{S巴}=0.000164Q_{巴}^{1.24}S_{石}^{1.083} \tag{9}$$

三湖河口站:

$$Q_{S三}=0.000159Q_{三}^{1.377}S_{巴}^{0.489} \tag{10}$$

头道拐站:

$$Q_{S头}=0.000064Q_{头}^{1.482}S_{三}^{0.609} \tag{11}$$

虚拟洪水条件如前所述,含沙量采用石嘴山 2 500 m³/s 流量下多年均值,为 5 kg/m³。利用公式(9)–(11),用输沙平衡法计算得到石—巴,巴—三,三—头 3 个河段的冲淤量分别为—181,—121,—35 万 t。见表 2,也是下游河段冲刷不多,与前面所述方法计算结果相吻合。

4 结 论

(1)通过实测资料、利用梯形面积近似代替水位变化引起的断面面积变化值可以近似计算出各时段由于冲淤引起的断面面积变化值,量化了次洪横断面面积变化。

(2)次洪横断面冲淤预估方法,具有广泛适用性。

应用在内蒙古河段,计算结果与传统的输沙平衡法计算结果相吻合,不但能够定性的反映河道冲淤情况,而且能够利用较少资料定性的对次洪横断面变化进行预估,为预估洪水冲淤导致的横断面面积变化及多沙河道治理决策者提供参考依据,为河道防灾减灾决策服务。

参考文献:

[1] 龙虎,杜宇,邬虹霞,等. 黄河宁蒙河段河道淤积萎缩及其对凌汛的影响[J]. 人民黄河,2007(29)3:25-26.
[2] 夏军强,王光谦,吴保生. 游荡型河流演变及其数值模拟[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005:137-177.
[3] 罗付岩,徐海云. 拟蒙特卡洛模拟方法在金融计算中的应用研究[J]. 数据统计与管理,2008(7):306-610.
[4] 秦毅,郑学萍,李怀恩,等. 渭河下游洪水变化特点及成因[J]. 干旱区资源与环境,2006,20(3):70-74.
[5] 赵文林,程秀文,侯素珍,等. 黄河上游宁蒙河道冲淤变化分析[J]. 人民黄河,1999,21(21)6:11-14.
[6] 杨根生,拓万全. 风沙对黄河内蒙古河段河道淤积泥沙的影响[J]. 西北水电,2004(3):44-49.
[7] 胡兴林,畅俊杰,赵昌瑞,等. 利用人造洪水冲刷黄河内蒙古淤积河道的可能性分析[J]. 中国沙漠,2007,27(6):1085-1089.
[8] 秦毅,张德生. 水文水资源应用数理统计[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2006:100-104.
[9] 张晓华,郑艳爽,尚红霞. 宁蒙河道冲淤规律及输沙特性研究[J]. 人民黄河,2008,30(11):42-44.

(上接第 182 页)

[8] 袁世琼. 流域平均降雨量计算方法的探讨[J]. 四川水利,1987(4):4-13.
[9] 傅抱璞. 山地气候[M]. 北京:科学出版社,1987.
[10] 孙鹏森,刘世荣,李崇巍. 基于地形和主风向效应模拟山区降水空间分布[J]. 生态学报,2004,24(9):1910-1915.
[11] 苏宏新,桑卫国. 山地小气候模拟研究进展[J]. 植物生态学报,2002,26(增刊):107-114.