

黑河流域磷迁移转化过程连续模拟研究

李怀恩¹, 胥彦玲¹, 张强¹, 倪永明²

(1. 西安理工大学环境科学研究所, 西安 710048; 2. 北京自然博物馆, 北京 100050)

摘要: 以西安市的主要供水水源黑河流域为例, 在 Matlab 软件辅助下, 使用蓄满产流模型、逆高斯分布汇流模型、水沙关系模型以及澳大利亚学者 Viney 所提出的营养物迁移转化模型对黑河流域 1981~1990 年磷的迁移转化过程进行了连续模拟, 模拟了磷的输出情况, 预测了黑河流域磷污染负荷量。结果表明: 模拟结果符合磷素流失的一般规律, 年径流量大的年份, 从流域输出的磷素也较多, 反之, 则较小; 对磷的连续模拟结果与实测插补延长后总磷年负荷量的相对误差基本上在 $\pm 30\%$ 以内, 结果较合理, 由此表明该法可用于黑河流域磷素迁移转化的连续模拟。同时, 本文模型只是流域非点源污染连续模拟的初步尝试, 尚需进行进一步检验、改进和完善。

关键词: 磷; Viney 模型; 连续模拟; 黑河; 流域

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)07-1292-07

Continuously Modeling Research on the Transfer and Transform Processes of Phosphorus in Heihe River Watershed

LI Hua-en¹, XU Yan-ling¹, ZHANG Qiang¹, NI Yong-ming²

(1. Institute of Environment Science of Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Beijing Natural History Museum, Beijing 100050, China)

Abstract: Taking supply water source of Xi'an city as an example, by the help of Matlab software, using fill and yield model, the Inverse-Gauss flow concentration model, runoff-sediment relation model and Viney model, the transfer and transform processes of phosphorus from 1981 to 1990 were modeled continuously. Phosphorus pollution loads of Heihe River were also estimated. The result shows that the continuous modeling result accorded with the generic law of phosphorus loss. The relative error between modeling result and monitor interpolation result was not more than $\pm 30\%$. So the modeling method proposed in this paper could be used to model continuously the transfer and transform processes of phosphorus in Heihe river watershed. This study was only primary attempt to non-point source pollution continuous model, therefore, the modeling method needed to be improved and perfected further.

Key words: phosphorus; Viney model; continuously modeling; Heihe River; watershed

水体富营养化在世界很多国家以及我国越来越严重, 已成为水环境的主要问题之一, 而随暴雨径流进入河流的营养物是造成富营养化的主要原因。基于单场洪水的非点源污染研究已相对成熟, 而有关非点源污染连续模拟的研究在我国相对较少。磷是淡水生态系统中最重要限制因素^[1~4], 以流域为尺度的磷素输出连续模拟对富营养化的控制和管理等具有重要的研究意义。

陕西黑河金盆水库是黑河引水工程的供水水源, 水库汇集黑河流域 1481 km² 的来水, 有着大约 4.5 km² 的大面积暴露水面, 是与取水口最近、关系最密切的区域, 水库保护的好坏直接关系输入净水厂的水质, 无论从安全角度, 还是预防污染角度考虑均需予以严格保护。因此, 本研究结合陕西黑河流域的自然地理条件, 使用新安江产流模型、逆高斯汇流模型、水沙关系模型以及澳大利亚学者 Viney 所提出的营养物迁移转化模型对黑河流域 1981~1990

年磷的迁移转化过程进行了连续模拟, 模拟了磷的输出情况, 预测了黑河流域磷污染负荷量, 对流域治理、环境政策的制定提供依据, 进而有利于减少流域内土壤中磷营养物的流失、抑制水质恶化、改善流域的生态环境。

1 研究方法 & 资料处理

本文旨在建立一个适合一般流域的营养物磷输出连续模拟模型, 并应用于黑河流域。为了提高模型的通用性、操作的简便性, 新安江产流模型、逆高斯分布瞬时单位线汇流模型、流域泥沙计算、磷迁移输出模型全部用 Matlab 语言编写, 水文资料用水文年

收稿日期: 2005-11-22; 修订日期: 2006-03-10

基金项目: 陕西省教育厅省级重点实验室重点科研计划项目 (05JS35); 教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划项目 (2001-282)

作者简介: 李怀恩 (1960~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为生态水文与水资源保护, E-mail: Lhuaein@mail.xaut.edu.cn

鉴格式输入,模型输出黑河流域总磷负荷率过程.由于模型要实现磷的连续模拟,所以要求资料也是连续输入的,利用已收集到的1981~1990年的降雨、蒸发资料作为输入.在水文模型中采用等时段降雨量作为输入,将该流域已有的8个雨量站的逐日降雨量资料和实测降雨量资料整理并做等时段化,时段为3h.

2 产汇流模型及其参数的率定

2.1 产流计算模型

黑河流域地处秦岭北麓,属半湿润地区,下垫面为植被良好的土石山区,植被覆盖率较高,根据流域地处半湿润地区的特性,拟采用新安江(三水源)模型作为黑河流域产流计算模型^[5~8].

2.2 汇流模型及其计算

净雨经过三水源划分,分为地表径流、壤中流和地下径流.不同的径流成分汇集到流域出口的路径和速度是不同的,流域汇流计算应采用不同的方法模拟.

2.2.1 降雨期汇流

降雨期汇流采用逆高斯分布瞬时单位线汇流模型^[9~11],逆高斯分布(Inverse Gaussian Distribution)是Tweedie提出的一种概率密度函数^[12].

设某次暴雨的净雨过程为 $h(t)$,则流域出口断面的流量过程 $Q(t)$ 可以由 $h(t)$ 逆高斯分布瞬时单位线 $f(t)$ 的卷积表示为:

$$Q(t) = \int_0^t f(t-\tau) h(\tau) d\tau \quad (1)$$

由于地面径流与地下径流的汇流特性不同,一般先将二者分别进行汇流计算,然后通过叠加得出总的流量过程线.逆高斯分布瞬时单位线在实测降雨资料的基础上可用矩法求参数 μ 和 λ 的值,然后再优选确定^[9~11].

2.2.2 非降雨期汇流(枯水期)

从新安江模型可以看出,枯水期虽然无地面径流,但是从自由蓄水库还是有壤中流和地下径流出流,形成枯期流量.因此,地下径流和壤中流出流计算采用新安江模型的线性水库计算办法.

(1) 地下径流的汇流采用线性水库

$$Q_G(t) = Q_G(t-1) \times KKG + RG(t) \times (1-KKG) \times U \quad (2)$$

式中, Q_G 为地下径流流量; KKG 为地下水蓄水库的消退系数; RG 为时段地下净雨; U 为单位转换系数.

(2) 壤中流的汇流采用线性水库

$$Q_{SS}(t) = Q_{SS}(t-1) \times KKSS + RSS(t) \times (1-KKSS) \times U \quad (3)$$

式中, Q_{SS} 为壤中流流量; $KKSS$ 为壤中流蓄水库的消退系数; RSS 为时段壤中流.在模型计算中为消除非线性的影响,减少计算时段取的过长所引起的误差,模型的水源划分中又用5mm净雨作一个量级,进一步作分步长计算.因此水源划分中的出流系数和汇流计算的消退系数都必须作相应变化.

设模型计算所取时段长为 Δt , R 为 Δt 内净雨,则:

$$M = \frac{24}{\Delta t} \quad (4)$$

$$N = \frac{24}{\Delta t} \left[\text{int} \left[\frac{R}{5} \right] + 1 \right]$$

计算步长内的壤中流蓄水库的消退系数($KKSSD$)和地下水蓄水库的消退系数($KKSSD$)分别与其相应的日模型消退系数($KKSS$)和(KKG)的关系为:

$$KKSSD = KKSS^{\frac{1}{M}} \quad (5)$$

$$KKGD = KKG^{\frac{1}{M}} \quad (6)$$

计算步长内流域自由水蓄水库的壤中流出流系数($KSSD$)和地下水出流系数(KGD)分别与其相应的日模型出流系数(KSS)和(KG)的关系为:

$$KSSD = \frac{1 - [1 - (KG + KSS)]^{\frac{1}{N}}}{1 + \frac{KG}{KSS}} \quad (7)$$

$$KGD = KSSD \frac{KG}{KSS} \quad (8)$$

在使用等时段化后的径流资料时,发现枯水期流量变化很小,为了保证枯水期流量有较大的稳定性,将地下径流设为常值,其大小为资料年限里的最小流量(假设发生最小流量时无壤中流).

经过资料统计1988-03-03~03-13的日均流量 $2.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 为10a来最小,故确定地下径流大小为 $2.3 \text{ m}^3/\text{s}$.为了保证地下径流不衰减,由(2)式可知当地下径流消退系数 KKG 大小为1h,地下径流不衰减.而非降雨期流量的变化只是壤中流的衰减所引起.为了进一步提高枯水期流量的模拟精度,对壤中流消退系数 $KKSS$ 率定.为了提高参数率定的效率,率定分2部分进行.

第1步,固定蒸发皿折减系数 K ,利用已获得的日蒸发资料,选择1~4月份的降雨、蒸发、流量资料,认为这一时期为枯水期,流量完全来自于壤中流

和地下径流,可以较真实地反映壤中流的消退过程,用这一时期的资料率定参数 KSS 、 KG 、 $KKSS$ 目标函数如下:

$$\begin{aligned} & \text{Min}[FUN(KG, KSS, KKSS)] \\ & = \text{Min}[ER] = \text{Min}\left[\sum |R_i - r_i|\right] \end{aligned}$$

第2步,在 KSS 、 KG 、 $KKSS$ 最优的情况下,固定这3个参数,选择1989年、1990年2a的全年蒸发、降雨、流量资料,率定参数 K 。

目标函数为:

$$\begin{aligned} & \text{Min}[FUN(K)] = \text{Min}[ER] \\ & = \text{Min}\left[\sum |R_i - r_i|\right] \end{aligned}$$

式中, R_i 为计算流量; r_i 为实测流量。由于参数相对较少,且变化幅度小,率定方法采用简单的步长加速法。

3 侵蚀模型及其参数率定

因为产流计算采用的是物理概念清楚的新安江模型,所以土壤侵蚀计算也宜采用物理模型。所有土壤侵蚀物理模型都必须有产流计算、径流计算,为了避免重复水文模型计算,本研究将土壤侵蚀的计算方法和新安江模型结合起来计算土壤侵蚀量。参考文献[13]中建立流量与含沙量相关关系,用流量直

接预测含沙量。具体做法如下:从实测流量与含沙量的等时段化后的资料里,摘取1981~1990年每年6~9月份的等时段化资料,点绘实测流量与含沙量资料,见图1(a)。

由图1可知,有3个点明显偏离点群,分别为点(16.8, 19.85)、点(24.2, 14.5)、点(23.4, 12.8)。分析对应的几场洪水,发现这几场有特性的洪水并不多见,因此可以考虑去掉以上3点使流量和含沙量呈现出更好的关系,结果见图1(b)。

最佳拟合关系为:

$$S = 0.000001Q^2 + 0.0022Q - 0.0222 \quad (9)$$

式中, S 表示含沙量(kg/m^3), Q 表示流量(m^3/s), $R^2 = 0.6114$ 。

通过各时段流量用(9)式直接计算出各时段含沙量,再与时段流量作积,求出各时段输沙率。在营养物迁移转化模型中把输沙率作为输入。每年11月到来年的3月,实测流量很小,实测日平均含沙量绝大多数为0,而同样的小流量在4~10月份月平均含沙量却不为0,为了提高含沙量计算精度,使用(9)式时做2点处理:第1,每年11月份到来年3月份的时段含沙量全部为0,4~10月份的流量做相关计算;第2,当流量小于 $10.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 使用(9)式时,含沙量将出现负值,出现这种情况时,让含沙量大小为0。

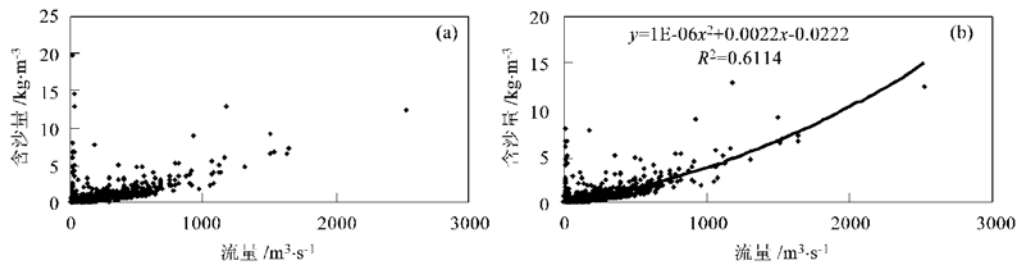


图1 黑峪口站10a实测流量含沙量关系

Fig. 1 Relation between monitor runoff and sediment of Heiyukou station

4 磷迁移转化模型

本文应用 Viney 模型^[14] 磷循环的有关计算方法进行流域磷的输出过程连续模拟,图2为磷的循环示意图。

4.1 磷循环

(1) 植物吸收磷

$$U_P = k_{UP} \frac{d\lambda}{dt} \quad (10)$$

式中, U_P 植物吸收的磷; k_{UP} 为比例常数,需要

模型优化的参数; $\frac{d\lambda}{dt}$ 表示植物叶面指数的变化率。

叶面指数变化率 $\frac{d\lambda}{dt}$ 反映一年四季中植物对磷吸收的变化情况,当 $\frac{d\lambda}{dt}$ 小于0时,表示在这个时候植物对磷几乎没有吸收,如秋季植物枝叶大量脱落时。植物吸收将A层(近河流滞水层)的无机磷转化为U层(营养物层)的无机磷和生物磷,即将 P_{IA} 转化为 P_{IU} 和 P_B 。

(2) 植物枝叶腐烂、垃圾腐烂以及作物收获所积

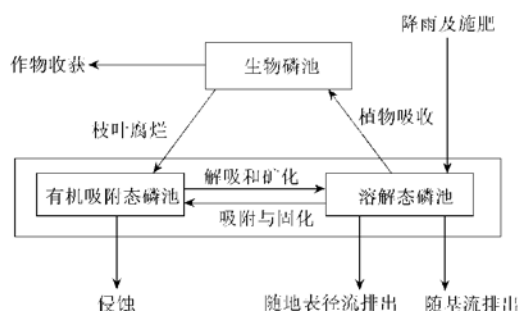


图2 磷循环模型结构图

Fig. 2 Structural map of phosphorus circulation

累的磷

$$H_P = k_{HP}P_B \quad (11)$$

式中, H_P 表示植物枝叶腐烂、垃圾腐烂及作物收获所积累的磷; k_{HP} 为固定的比例常数; P_B 为流域中生物态磷的储量。

(3) 磷的转化

溶解态磷、有机态磷的相互转化是通过磷的矿化和固化作用; 溶解态磷和吸附态磷的相互转化是通过磷的解吸和吸附作用, 在模型中将这 2 个过程用同 1 个方程来描述:

$$M_P = K_{MP} \frac{1}{r+1} (P_0 - rP_1) \quad (12)$$

式中, M_P 为流域中净解吸和矿化的磷的总量; r 为滞留指数; K_{MP} 为和土壤湿度和温度有关的参数, 在模型中等于 1。模型中溶解态磷、有机吸附态磷分别作为 2 个磷库, 从中产生地表径流携带磷、基流携带磷以及地表侵蚀携带磷。

4.2 溶解态磷的计算

(1) 降雨中的磷

假设雨水中的无机磷的浓度是固定的, 不随时间和空间发生变化, 用 c_P 来表示。由于植物截流, 使得雨水中的部分磷未能进入河流出口断面, 因此在模型中磷的浓度相应地进行修正:

$$c_{Pg} = c_P p / p_g \quad (13)$$

式中, c_{Pg} 为修正后的磷的浓度, 即净雨中磷的浓度; p 为上层植物截流雨量; p_g 为总雨量。这部分磷最终随着地表径流进入河流出口断面, 用 q_s 表示地表径流量, 这样 $c_{Pg} q_s$ 就是雨水中进入流域出口断面的磷的量。

(2) 地表径流溶解并携带部分 A 层中的磷

地表径流和下层的土壤相互作用, 溶解了部分无机磷, 最终随地表径流到达河流出口断面, 该部分无机磷采用下式计算:

$$S_P = k_{SP} q_s P_I \quad (14)$$

式中, S_P 为随地表径流溶解流走的 A 层中的磷; k_{SP} 为模型优化参数; q_s 为地表径流; P_I 为流域中无机磷的储量。

(3) 随壤中流从 U 层进入 A 层的磷

无机磷在水流侧向流动中从上层土壤(U 层)进入到近河流层(A 层), 这部分的磷用下式计算:

$$T_P = k_{TP} q_{ss} P_{IU} \quad (15)$$

式中, T_P 为随壤中流从 U 层进入 A 层的磷; k_{TP} 为模型优化参数; q_{ss} 为壤中流的大小; P_{IU} 为 U 层中无机磷的储量。

(4) 随基流排泄出去的磷

A 层为近河流滞水层, 认为 A 层是饱和的, 所以 A 层中的无机磷会流到河流出口断面, 计算采用:

$$A_P = P_{IA} q_A / A \quad (16)$$

式中, A_P 为随基流排泄出去的磷; P_{IA} 为流域中 A 层蓄积的无机磷储量; q_A 为基流的大小; A 为 A 层的体积。

这样, 河流出口断面所排泄的溶解磷的总量为:

$$A_{PI} = c_{Pg} q_s + S_P + A_P \quad (17)$$

式中, A_{PI} 为河流出口断面所排泄的溶解磷的总量。

以上各表达式中流量的单位为 m^3/s , 磷的储蓄量单位为 1 000t, 所计算的各项磷的流失量实际为负荷率 g/s 。

4.3 颗粒态磷的计算

(1) 土壤侵蚀携带的磷

在 Viney 模型中由于没有上层土壤有机磷和吸附态磷的资料, 对于地表侵蚀引入了 1 个侵蚀富余比例。

$$X_P = k_{XP} / Y_E^{\beta_{XP}} \quad (18)$$

式中, X_P 为侵蚀富余比例因子, 模型中 $1 < X_P < 10$; k_{XP} 为模型优化参数; Y_E 为土壤侵蚀量; β_{XP} 为模型优化参数, 在模型设计中 $0 < \beta_{XP} < 1$ 。

借助侵蚀富余比例因子 X_P , 计算随土壤侵蚀而到达流域出口断面的有机附着态磷的量为:

$$E_P = k_{EP} X_P Y_E \quad (19)$$

式中, E_P 为随土壤侵蚀而到达流域出口断面的有机附着态磷; k_{EP} 为模型优化参数。

(2) 河床中随径流再启动的磷

在水流的作用下, 河道里的泥沙随水流重新启动, 吸附在泥沙上的颗粒态磷也随之启动, 计算

采用:

$$R_P = P_{OC} (Y_R / S_C)^{\beta_{RP}} \quad (20)$$

式中, R_P 为随泥沙重新启动的颗粒态磷; P_{OC} 为河道中有机磷的储量; Y_R 为随径流重新启动的泥沙量; S_C 为河道泥沙储量; β_{RP} 为模型优化参数且小于 1.

(3) 随泥沙沉积而沉积在河道里的磷, 计算采用:

$$W_P = [Z / (Y_E + Y_I)]^{\beta_{DP}} (E_P + I_P) \quad (21)$$

式中, Z 为河道携带泥沙能力; W_P 为随泥沙沉积而沉积在河道里的磷; Y_E 为本段河流泥沙含量; Y_I 为上游河段进入计算河段的泥沙量; E_P 为随土壤侵蚀而到达流域出口断面的有机附着态磷; I_P 为上游河段进入计算河段颗粒态磷的量; β_{DP} 为模型优化参数.

(4) 随河床、河道冲刷而进入水流的磷

水流对河道、河床的冲刷, 使得部分泥沙携带着磷被水流带到了流域出口断面. 这部分计算采用:

$$B_P = k_{BP} P_{OA} Y_B \quad (22)$$

式中, B_P 为随河床、河道冲刷而进入水流的磷; k_{BP} 为模型优化参数; P_{OA} 为 A 层中有机磷的储量; Y_B 为河道、河底被水流冲刷的泥沙量.

(5) 随泥沙沉淀而沉淀在河里的磷

计算采用:

$$D_P = (1 - \Phi)^{\beta_{DP}} (E_P + I_P + B_P - W_P) \quad (23)$$

式中, D_P 为随泥沙沉淀而沉淀在河里的磷; Φ 为泥沙沉降比例; β_{DP} 为模型优化参数.

根据以上颗粒态磷的计算, 通过河流向流域出口断面排泄的有机态磷总量为:

$$Q_{PO} = E_P + I_P + B_P - W_P - D_P \quad (24)$$

河道中有机磷储量的变化为:

$$\Delta P_{OC} = W_P + D_P - R_P \quad (25)$$

4.4 模型简化及参数率定

图 2 表明, 植物吸收的磷, 植物枝叶腐烂、作物收获在流域中积聚的磷, 以及随降雨进入流域中的溶解态磷对磷循环都有一定影响, 但受资料条件限制本文未详细计算, 在总模型中集中体现吸附态磷池和有机态磷池. 式(12)用来描述吸附态磷转化为溶解态磷(通过磷的解吸作用)以及有机态磷转化为溶解态磷(通过磷的矿化作用). 在 Viney 模型里, 参数 K_{MP} 取值为 1, 所以起控制作用的只有滞留指数 r . 在无文献的情况下, 针对黑河流域只能估算出.

黑河流域 3h 实测总磷负荷率为 0.1~0.5 kg/s, 由此估算 r 的值可取 4.9. P_0 、 P_I 表示流域中有机磷和无机磷的储量, 作为模型计算的初始输入值. 在没有数值的情况下, 可以根据流域中总磷的储量估算. 由于 1981 年并没有实测土壤的含磷量, 而 1995 年有实测值, 见表 1. 黑河流域林业用地所占土地总面积的比例为 94.08%, 耕地为 2.24% (其它土地利用类型未列出)^[15], 由此计算流域土壤平均磷含量为 6 mg/kg. Viney 模型假设流域表层 5cm 的厚度内发生营养物的迁移转化, 用流域面积、流域厚度 (5cm)、流域平均的容重、平均含磷量估算出流域的总磷含量, 单位为 10^3 t. 因为模型为 10a 连续计算, 一般随着模型的计算, 初始值对模型的结果影响逐渐减小, 所以将估算的流域总磷含量作为逐年计算时的年初输入和整个 10a 计算的初始输入.

式(18)~(19)在 Viney 模型中用以计算随土壤侵蚀流出流域的颗粒态磷, 但是在本文的模型中用来计算所有形态颗粒态磷的输出量. 输入项为断面的土壤侵蚀量, 采用前述泥沙计算的结果. 参数有 k_{XP} 、 β_{XP} 、 k_{EP} . 在 Viney 中 $0 < \beta_{XP} < 1$, 且 $1 < X_P < 10$, 根据黑河流域实测年平均输沙率, 可计算得到平均 1 个时段 (3h) 的输沙量的量级为 10~100t, 由(18)式可以估算 $k_{XP}=100$ 、 $\beta_{XP}=0.3$, k_{EP} 优化确定.

表 1 黑河流域土壤总磷监测结果

Table 1 Monitor result of soil total phosphorus in Heihe River watershed

站位号	土壤类型	土壤利用现状	总磷 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	平均 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
1	暗棕壤	原始森林	6.577	8.98
2	暗棕壤	原始森林	11.377	
3	棕壤-褐土	耕地	6.71	4.21
4	棕壤-褐土	耕地	1.727	
5	褐土	次生林	0.793	0.92
6	褐土	次生林	1.041	

这样, 磷模型一共有 6 个参数, 分别为 K_{MP} 、 k_{SP} 、 k_{TP} 、 k_{XP} 、 β_{XP} 和 k_{EP} . 其中 $K_{MP}=1$ 、 $k_{XP}=100$ 、 $\beta_{XP}=0.3$, 需要率定的只有 k_{SP} 、 k_{TP} 、 k_{EP} .

由于模拟年限 (1981~1990 年) 无实际水质监测资料, 而 1995 年和 1996 年有 6 场非点源污染实测资料, 故将 1995 年、1996 年的 6 场实际监测值与相应径流量建立相关关系 ($P_i = 0.6198 Q - 17.396$, 相关系数 $R = 0.9997$; Q 为实测次暴雨径流量, 单位为 10^4m^3) 后, 用于由径流量插补 1981~1990 年对应的总磷负荷, 再将结果等时段化, 记为

P_i , 近似作为参数率定的依据, 模型计算结果记为 p_i . 为了减小参数率定的工作量, 因为每 1 年里均包含了降雨期和非降雨期, 所以考虑用几年的连续资料进行参数率定, 参数即可达到最优. 率定时 1981~1983 年作为率定期, 1984~1990 年作为检验期. 目标函数如下:

$$\begin{aligned} & \text{Min}[FUN(k_{SP}, k_{TP}, k_{EP})] \\ & = \text{Min}[ER] = \text{Min}[|P_i - p_i|] \end{aligned} \quad (26)$$

优选率定的方法也有多种, 如网格逐步缩小法、步长加速法、模矢搜索法、惩罚函数法等. 考虑到待率定参数较少, 采用步长加速法率定参数. 率定结果见表 2.

表 3 模型计算与实测插补延长后总磷负荷量

Table 3 Total phosphorus loads of model calculation and monitor interpolation										
指标	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
实测径流量 $\times 10^8/\text{m}^3$	12	5.81	12.2	8.83	5.21	5.11	7.01	6.46	6.31	6.69
水质流量相关计算负荷/t	74.4	36.0	75.6	54.7	32.3	31.6	43.4	40.0	39.1	41.5
模型计算负荷/t	89.6	27.5	99	62.5	26.9	30.5	41	51.3	42	56
相对误差/%	17.0	-30.9	23.6	12.5	16.6	-3.8	-5.9	22.0	6.9	26.0

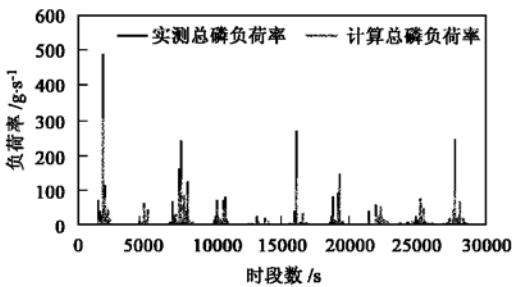


图 3 1981~1990 年营养物模型计算结果
Fig. 3 Calculation result of nutriment model from 1981 to 1990

表 3 表明, 本研究对磷的连续模拟结果与实测插补延长后总磷负荷量的相对误差基本上都在 $\pm 30\%$ 以内, 1982 年、1983 年、1988 年以及 1990 年的误差较大; 丰水年 1981 年、1983 年的总磷计算负荷量分别为 89.6t 和 99t, 其中 1983 年的径流量最大, 对应的计算总磷负荷量也最大; 枯水年 1982 年、1985 年以及 1986 年的计算总磷负荷量在 10a 中较小, 分别为 27.5t、26.9t 以及 30.5t; 其余年份为平水年, 年径流量在 $6\sim 9\times 10^8\text{m}^3$ 之间, 计算总磷负荷量约在 40~65t 之间. 从而说明, 模型的计算结果符合磷素流失的一般规律: 年径流量大的年份, 从流域流出的磷素也多, 反之, 亦然. 图 3 表明模型计算的

表 2 营养物模型参数率定结果

Table 2 Preferences result of nutrient model			
参数名	k_{SP}	k_{TP}	k_{EP}
参数值	0.6	0.13	16.4

5 结果与讨论

通过上述产汇流模型、侵蚀模型以及磷迁移转化模型, 将参数进行率定后对 1981~1990 年总磷负荷进行连续模拟, 同时将 1995 年、1996 年的 6 场洪水的实际监测值与对应的径流量建立相关关系后进行延长插补, 获得 1981~1990 年磷负荷的计算结果, 见表 3. 1981~1990 年营养物模型计算结果见图 3.

最大负荷率出现在 1981 年, 效率最高的年份为 1986 年, 见图 4, 最差的为 1988 年, 见图 5.

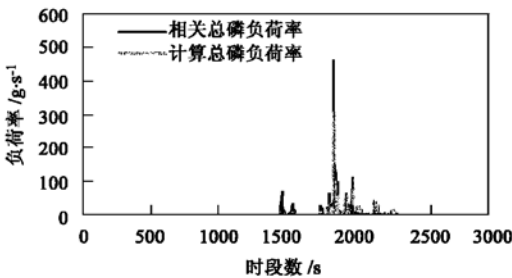


图 4 1986 年营养物模型计算结果
Fig. 4 Calculation result of nutriment model in 1986

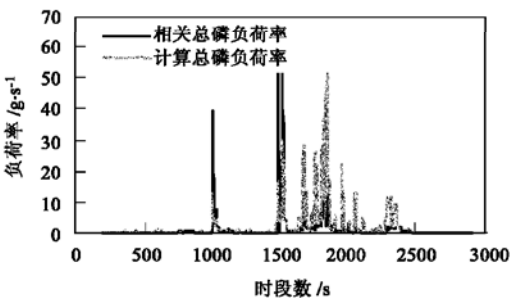


图 5 1988 年营养物模型计算结果
Fig. 5 Calculation result of nutriment model in 1988

6 结论

本文尝试对西安市黑河流域的非点源磷输出进行连续模拟,产流计算采用新安江模型,汇流计算采用逆高斯分布模型,磷的循环与输出采用 Viney 模型.黑河流域的模拟结果表明,总磷负荷的计算结果在整体上是合理的,符合磷素流失的一般规律.因此,本文模型与方法可供其它流域参考.由于本文采用集总模型,加之资料有限,模拟结果还存在一定的误差,有待今后改进和完善.

参考文献:

- [1] OECD. Eutrophication of waters: monitoring, assessment and control[R]. Paris: OECD, 1982. 154.
- [2] Freedman B. The impacts of pollution and other stresses on ecosystem structure and function[M]. San. Diego: Academic Press Inc, 1989.
- [3] Schindler D W. Eutrophication and recovery in experimental lakes: implication of lake management[J]. Science, 1974, **184**: 897~ 899.
- [4] Schindler D W. The evaluation of phosphorus limitation in lakes[J]. Science, 1977, **195**: 260~ 262.
- [5] 胡彩虹,郭生练,彭定志,等.半干旱半湿润地区流域水文模型分析比较研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, **36**(5): 38~ 42.
- [6] 赵人俊.流域水文模拟——新安江模型和陕北模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984. 106~ 130.
- [7] 杨小辉,郭菲菲.率定新安江模型(三水源)产汇流参数[J]. 贵州水力发电, 2000, **14**(1): 7~ 10.
- [8] 崔庆忠,高世斌,车延路.新安江三水源模型在浦河流域上的应用[J]. 东北水利水电, 2002, **21**(3): 32~ 35.
- [9] 李怀恩,樊尔兰,沈冰.流域汇流计算的逆高斯分布模型[J]. 水利水运科学研究, 1994, (2): 147~ 151.
- [10] 李怀恩,沈晋.非点源污染数学模型[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1996. 43~ 52.
- [11] 李怀恩,沈晋.流域非点源污染模型的建立与应用实例[J]. 环境科学学报, 1997, **17**(2): 141~ 147.
- [12] Tweedie M C K. Statistical Properties of Inverse Gaussian Distributions: I, II[J]. Ann. Math. Statist, 1957. 28.
- [13] 《黑河引水工程水源保护研究》课题组.黑河引水工程水资源保护研究技术总报告[R]. 西安: 陕西省环境科学研究设计院、西安理工大学, 1998.
- [14] Viney N R, Sivapalan M, Deeley D. A conceptual model of nutrient mobilization and transport applicable at large catchment scales[J]. Journal of Hydrology, 2000, **240**: 23~ 24.
- [15] 樊尔兰.西安市黑河流域暴雨洪水预报方案初步研究[R]. 西安: 西安理工大学水利水电研究所, 1992.