

流域管理模型的参数灵敏度分析

——以 WARMF 在巢湖地区的应用为例

蒋 颖, 王学军, 罗定贵

(北京大学环境学院, 北京 100871)

摘 要: 水质模型参数灵敏度分析不仅是模型率定的必要前提, 也为水质管理提供参考。WARMF 模型是大型流域管理分布式机理模型, 选定巢湖流域杭埠—丰乐河子流域为研究区域, 通过流域概化将杭埠—丰乐河流域划分为 37 个汇流区单元、36 个河段单元和 1 个湖泊单元。之后, 以杭埠—丰乐河流域 4 号子流域及其河段为例, 采用局部灵敏度分析方法对模型水文、泥沙、水质主要参数进行了灵敏度分析。根据灵敏度分析结果进行调参, 可以大大节省模型参数的校核时间, 并且提高精度。

关键词: 模型; 参数; 灵敏度分析; WARMF; 巢湖

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)03-0165-04

Parameters Sensitivity Analysis of Watershed Management Model

——Application of WARMF Model in Chaohu Lake Area

JIANG Ying, WANG Xue-jun, LUO Ding-gui

(College of Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Parameter sensitivity analysis of water quality model is the basis of model calibration, and can also provide reference to water quality management. WARMF (Watershed Analysis Risk Management Frame) is a distributed watershed management model. Hangbu River-Fengle River watershed of Chaohu Lake basin was selected as the research area. This watershed was divided into 74 units, which includes 37 subwatershed, 36 river segments and 1 lake unit. Partial sensitivity analysis was applied to study the sensitivity of main parameters of WARMF model, including hydrology, sediment, water quality, in the No. 4 subwatershed and No. 4 river segment of the selected study area. Based on the analysis result, efficiency of model calibration can be significantly improved.

Key words: model; parameter; sensitivity analysis; WARMF; Chaohu Lake

WARMF 是由美国 EPRI 发起研制的为支持流域管理和 TMDL 计算而设计的决策支持系统^[1]。该模型是一种建立在水文循环基础上的动态、分室、集中参数模型。不同于 AG-NPS^[2] 等流域网格化的分室模型, WARMF 按照模拟的需要, 将流域分成若干汇流区(即子流域)单元(汇流区单元进一步分成树冠层、积雪层、若干土壤层)、河流单元与湖泊单元(进一步分为若干层)。WARMF 中各单元假定相互隔离, 单元内部均匀混合, 即 CSTR(continuously stirred tank reactor)。它们是水文、水质分析的基本对象。该模型可以通过引导涉益者(stakeholders)参与水质管理方案制定、总量负荷计算、分配及其成本/效益分析达到对整个流域进行管理的目的^[3], 在美国卡托巴河流域(Catawba River Basin)、狄龙湖流域(Dillon Lake Watershed)等多个流域进行了成功应用^[4], 目前国内尚未见应用报道, 具有很强的推广意义。

我们将 WARMF 模型引入国内巢湖流域进行流域水质管理研究。巢湖位于长江中下游的安徽省中部, 为中国五大淡水湖泊之一, 流域经济以农业为主, 是安徽省高产粮区之一, 化肥施放量较大。杭埠—丰乐河是巢湖的最大支流, 占巢湖入湖径流总量的 63.4%, 是巢湖最大的非点源污染贡献者。

由于空间差异性、预算约束等原因, 模型输入参数在某

种程度上总是不确定的^[5]。参数的灵敏度分析不仅有助于避免模型调参工作陷入混乱无序, 还可以引导更好的理解、评估和减少不确定性。参数灵敏度分析也可以作为一种考察人为活动对自然物理性状改变的方法, 如 Huisman 等^[6]通过对 SWAT-G 模型在德国 Dill 流域的参数灵敏度分析, 研究土地利用类型改变对顶层土壤厚度、体积密度、导水率、可利用水容量等土壤性质的影响。因此, 参数灵敏度分析是模型使用过程中不可或缺、有较强实用意义的一步工作。

作为整体研究的一部分, 本文选择巢湖流域代表支流——杭埠—丰乐河流域的 4 号子流域及其河段作为研究对象进行模型水文、泥沙与水质参数的灵敏度分析, 目的在于识别影响流域水文、水质的敏感因子, 以及他们对结果的影响特点, 为后续模型参数的校核与检验奠定基础。

1 流域概化

WARMF 模型模拟的基本单元是 CSTR, 因此流域概化是在研究流域尝试使用该模型的一项基础工作。Manillapalli^[7]对 SWAT 模型的相关研究显示: 模型的径流预测对亚流域的数量具有一定的敏感性; 子流域数量大于 37 时, 径流、泥沙趋于稳定。结合研究流域地形、土壤、土地利用等特征, 嵌入 1:250000 的

DEM,使用 AVSWAT 2000 中的地形分析模块,基于 1:25 万 DEM,采用 TOPOAZ (Topographic Parameterization) 软件包自动进行数字地形分析,同时参考流域实际环境特点,将杭埠-丰乐河流域划分为 37 个子流域,36 个河段单元,1 个湖泊单元。流域概化结果及 4 号子流域位置如图 1 所示。

2 模型参数灵敏度分析方法与过程

2.1 分析方法

模型参数的灵敏度分析包括局部灵敏度分析和全局灵敏度分析。局部灵敏度分析检验单个参数的变化对模型结果的影响程度;全局灵敏度分析则检验多个参数的变化对模型运行结果总的影响,并分析每一个参数及其参数之间相互作用对模型结果的影响^[8]。

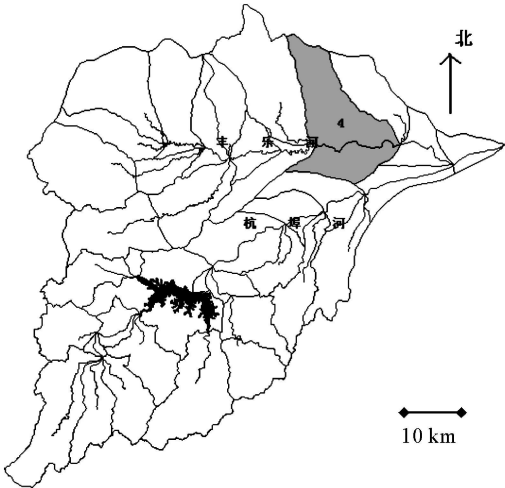


图 1 杭埠-丰乐河流域子流域、河段划分及 4 号子流域、河段示意图

局部灵敏度分析方法简单、计算量较小、易于实施、应用较广。全局灵敏度分析方法目前主要有多元回归法、Morris 法^[9]、傅里叶幅度灵敏度检验法 (Fourier Amplitude Sensitivity Test) FAST^[10-12] 及基因法、罗森布瑞克法、单纯形法^[13]。全局灵敏度分析考虑了多参数间的综合作用,有利于得到整个参数集的最优解,但是其计算量巨大,很难适用于参数较多的复杂模型。大多数使用全局参数灵敏度分析的案例参数量较小,如:王建平等采用遗传算法对 WASP 模型 10 个待识别的水质模型参数进行了参数灵敏度分析^[14]。

鉴于此,本文采用局部灵敏度分析方法进行模型水文、泥沙与水质参数的灵敏度分析,分析原理为:设任意一项模型水文、水质输出 Y_i 为其参数集 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 的函数。对其中任意一个参数 $X_j, j \in [1, n]$, 进行参数敏感分析时,固定其他参数取值,改变 X_j 取值 ΔX_j , 得到输出 Y_i 的变化 ΔY_i 。

$S(Y_i, X_j) = \frac{\partial Y_i / Y_i}{\partial X_j / X_j}$, 式中: $S(Y_i, X_j)$ —— Y_i 对输入参数的灵敏度; $\frac{\partial Y_i}{\partial X_j}$ —— 边际函数 (偏导数); $\frac{Y_i}{X_j}$ —— 平均输入输出响应。

$S(Y_i, X_j)$ 值的大小表达了在当前位置处参数微小变化引起 Y_i 值变化速率与平均变化速率的比值,以此表示 Y_i 对输入参数 X_j 的灵敏度大小。 $S(Y_i, X_j)$ 的大小与输入参数 X_j 所处位置有关。

本文参考 Lenhart^[15] 等使用的灵敏度分析方法,将 $S(Y_i, X_j)$ 近似为: $S(Y_i, X_j) = \frac{\square Y_i / Y_i}{\square X_j / X_j}$ 。

2.2 分析过程

根据巢湖流域现有监测数据、参数物理意义和其它地区调参经验,确定各参数可能的取值范围。输入气象数据驱动

模型运行。

首先,进行水文参数的灵敏度分析:对所有水文参数进行对径流最大值、均值与最小值的灵敏度分析,并绘制灵敏度变化曲线,分析完成之后,据参数灵敏度变化特点进行水文参数的校核与检验,如有的参数影响径流的最大值,而不影响均值等,然后根据水文拟合现状有意识进行参数的调节,直到拟合达到最佳状态。关于参数的校核与检验过程在此省略,主要介绍灵敏度分析成果。

其次,进行泥沙参数的灵敏度分析,并绘制变化曲线,完成后进行泥沙参数的校核与检验。最后进行水质参数的灵敏度分析以及绘制变化曲线,完成后进行水质参数的校核与检验,本文主要研究与氮有关水质参数的灵敏度分析。

3 参数灵敏度分析成果

本文给出将 WARMF 模型应用于巢湖杭埠-丰乐河流域 4 号子流域及河段的参数识别结果,以及识别出的灵敏参数对模型输出的影响特征。

3.1 参数识别结果

参数灵敏度识别结果见表 1,其中用阴影标识出较为灵敏的参数。

表 1 4 号子流域、河段水文、泥沙及氮污染状况参数识别结果

参数类型	水文参数	泥沙参数	水质参数
汇流参数	地表滞留 / %	土壤侵蚀系数 / none	施肥 / (kg · m ⁻²)
	地表粗糙度 / none	缓冲带百分比 / %	阳离子交换量 / meq / 100g
	降水权重因子 / none	缓冲带宽度 / m	NH4 吸附百分比 / %
	平均温度梯度 / °C	缓冲带坡度 / none	土壤硝化作用率 / a ⁻¹
	海拔温度梯度 / (°C · m ⁻¹)	缓冲带粗糙系数 / m ^{1/3} / s	植被硝化作用率 / a ⁻¹
	土层厚度 / cm		土壤反硝化作用率 / a ⁻¹
	田间持水量 / (m ³ · m ⁻³)		植被反硝化作用率 / a ⁻¹
	饱和湿度 / (m ³ · m ⁻³)		
	水平导水率 / (cm · d ⁻¹)		
	垂直导水率 / (cm · d ⁻¹)		
河床参数	曼宁系数 / none	剥蚀速度系数 / none	沉积物需氧量 / (g · m ⁻² · d ⁻¹)
	热传导系数 / none	剥蚀速度指数 / none	硝化作用率
		初始沉积深度 / m	反硝化作用率 / a ⁻¹
	河床植被因子 / none	沉积物沉降速率 / m / a	
	河床稳定系数 / none	藻类生长率 / d ⁻¹	
	河床颗粒组成 / %	藻类生物呼吸率 / d ⁻¹	
	藻类死亡率 / d ⁻¹		
	蒸发系数 / none	耕作因素 / none	叶面积指数 / none
	蒸发系数偏度 / none	降雨侵蚀因子 / (g · cm ⁻³)	干收集效率 / none
	系 土壤热传导率 / (cm · d ⁻¹)	流速分离因子 / (kg · m ⁻⁴)	叶合成分 / (mg · g ⁻¹ · d ⁻¹)
参 数	统覆雪层热传导率 / (cm · d ⁻¹)	沉降速度 / (mm · s ⁻¹)	浮游植物氮半饱和度和 / (mg · l ⁻¹)
	参 冰层热传导率 / (cm · d ⁻¹)		浮游植物光半饱和度和 / (W · m ⁻²)
	数 雪形成温度 / °C		藻类生存温度范围 / °C
	雪融解温度 / %		水生附着生物氮半饱和度和 / (mg · l ⁻²)
			水生附着生物光饱和度和 / (W · m ⁻²)

注:表中斜体字表示的参数是可以根据相关研究及当地资料确定取值,调参时无需调整的参数。将这一部分参数标识是为进行流域管理方案设计选择提供参考。

3.2 敏感参数灵敏度特征分析结果

篇幅所限,不能在此一一给出分析曲线,在水文、泥沙与水质敏参数中各选一个代表参数研究灵敏度曲线的变化特点,分别是河流曼宁系数、河床植被因子、河流硝化作用率,各自的灵敏度变化曲线见图 2—图 4。并总结主要参数取值范围和灵敏度变化特征(见表 2)。

敏感参数灵敏度分析代表曲线分析

河流曼宁系数对径流影响曲线见图 2:河流曼宁系数是水文模拟灵敏参数,但对径流模拟均值基本没有影响。主要对径流最大、最小值模拟产生影响。其中,对径流最大值的影响为负向影响。对模拟结果最小值的影响方向在 0.1 处从正向影响转为负向影响且灵敏度剧增,因此:0.1 是该流

域河流曼宁系数一个需要特别注意的取值点; 如果只是关心均值的模拟, 将 WARMF 应用于巢湖杭埠- 丰乐河 4 号子流域及河段时无需对河流曼宁系数进行调参。

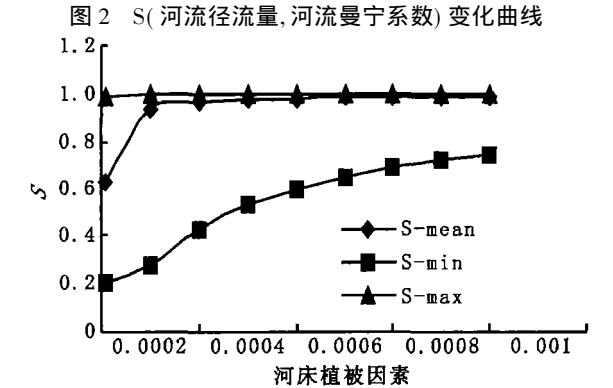
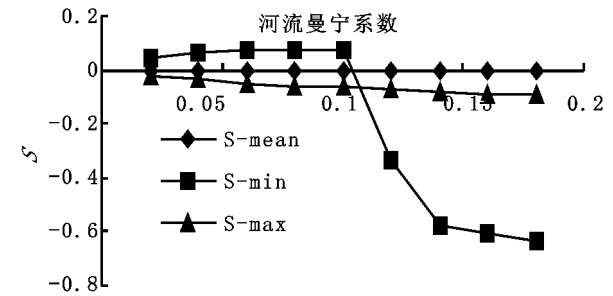


图 3 S(河流总悬浮物, 河床植被因素) 变化曲线

河床植被因素对总悬浮物影响灵敏度曲线见图 3: 河床植被因素是泥沙模拟灵敏参数, 对总值及最大值的灵敏度接近 1, 影响非常大。对最小值模拟的影响随着河床稳定性的增加明显增大。在参数灵敏度分析过程中还发现: 河床稳定

因素与河床植被因素的灵敏度曲线完全一致, 因此, 调节河床植被因子与调节河床稳定性因子对模拟结果的影响等价。说明在巢湖杭埠- 丰乐河流域 4 号河段, 河床植被状况是河床稳定性的决定因素。

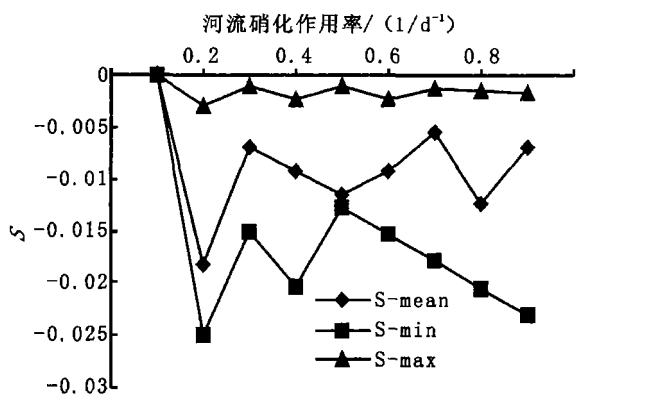


图 4 S(河流总氮, 河流硝化作用率) 变化曲线

河流硝化作用对总氮影响的灵敏度曲线见图 4: 河流硝化作用率是水质灵敏参数。从硝化作用对水质结果的影响程度上看, 河流硝化作用率对最小值影响最大, 其次是均值, 最后是最大值。从曲线总体变化趋势上看: 硝化作用增加, 河流总氮呈下降趋势, 但中间有一些反复。从特殊点看: 三条曲线基本都在 0.2 处取得灵敏度的最大值。

(2) 主要参数影响特征

总结主要灵敏参数的取值变化区间, 以及灵敏度曲线变化特点(如表 2 所示)。其中水文参数主要考虑其对径流量模拟值均值、最小值、最大值的影响, 泥沙参数主要考虑其对总悬浮物模拟值均值、最小值、最大值的影响, 水质参数主要考虑其对总氮模拟值均值、最小值、最大值的影响。

参数		灵敏度分析范围	影响特征
水文参数	河流曼宁系数	0.02~ 0.18	均值灵敏度基本为零; 最小值最灵敏, 0.1 是最小值灵敏度拐点(从正向影响转为负向影响)。见图 2
	降水权重因子	0.6~ 1.4	灵敏度随参数扩大线性上升($R^2 > 0.99$), 说明径流量与降水权重因子呈二阶相关关系; 其灵敏度: 均值 > 最大值 > 最小值。
	田间持水量	0.1~ 0.4	对最大值完全没有影响; 对最小值影响很大, 尤其在 0.35 左右, 参数灵敏度超过 1。第三层土壤田间持水量影响较一、二层大。
	蒸发系数	0.6~ 1	对均值影响较大; 参数取值大于 0.76 以后对最小值无影响。
	土壤饱和湿度	0.4~ 0.6	仅对均值有影响且第三层土壤饱和湿度对径流量影响最大, 均值灵敏度随参数取值增大呈大致减小的趋势。
	土层厚度	20~ 47; 100~ 400	仅对均值有影响, 第一层土壤厚度灵敏度大于二、三层。
	蒸发系数偏移	0.6~ 1.32	灵敏度呈波形变化; 对最小值正向影响, 对均值及最大值负向影响; 最小值灵敏度峰值最大, 最大值灵敏度峰值最小。
泥沙参数	河床植被因素	0~ 0.0008	均值及最大值灵敏度基本稳定在 0.93~ 1 之间, 最小值灵敏度呈抛物线上升。见图 3
	河床稳定系数	0~ 0.0008	与河床植被因素的影响等价。
	剥蚀速度指数	1.0~ 1.9	均值灵敏度基本在 0.1 左右浮动; 参数取值大于 1.3 以后最大值灵敏度有较明显增加趋势, 最小值灵敏度从 0 骤增至 4 以上。
	初始沉积深度	0.1~ 2.0	0.5 以后灵敏度为 0; 同时 0.5 处是最小值的极敏感点, 其敏感度骤升至 5 以上。
水质参数	NH4 吸附百分比	0.2~ 0.6	0.45 附近是均值的敏感区, 最小值敏感度变化较大且影响方向不固定, 第一层与第二层土壤的敏感度曲线比较一致。
	土壤硝化作用	0.01~ 0.1	影响方向不固定, 但基本呈现随参数值增大敏感度上升的趋势, 接近 0.1 处敏感度达到其最大值。
	离子交换量 CEC	10~ 20; 10~ 24; 10~ 28	对最小值影响最明显。
	土壤反硝化作用	0.01~ 0.1	其影响: 最小值 > 均值 > 最大值。对均值正向影响, 对最大及最小值影响方向不固定。
	河流硝化作用	0.1~ 1	均为反向影响, 参数取值小于 0.2 时其变化对总氮无影响, 0.2, 0.4, 0.8 为敏感点, 其影响: 最小值 > 均值 > 最大值。见图 4
	叶合成物	0~ 20	其变化对 NH4 完全无影响。

注: 正向影响 —— 模拟值随着参数取值的增大增加; 负向影响 —— 模拟值随着参数取值的增大减小。

以上分析结果显示,将 WARMF 应用于巢湖杭埠-丰乐河流域 4 号子流域及河段应注意:

(1) 水文参数:

降水权重因子、土层厚度、土壤饱和湿度、土壤导水率、蒸发系数主要影响河段径流均值,拟合径流均值需要特别注意这些参数。田间持水量、蒸发系数偏移、河流曼宁系数主要影响最小值模拟,如进行干旱风险分析需特别注意这部分参数。对拟合最大值影响最大的是河流曼宁系数,进行暴雨及非点源风险预测需要特别注意河流曼宁系数的校准。

(2) 泥沙参数:

影响悬浮物模拟均值及最大值的主要因素为河床植被因素和河床稳定因素,二者对拟合结果的影响具有等价性,这说明植被增加可以提升河床稳定性,增加植被覆盖是减少泥沙的有效方法。

影响总悬浮物最小值拟合的主要参数是剥蚀速度指数和初始沉积深度。初始沉积深度超过 0.5 以后灵敏度为零,说明不需要对大于 0.5 的参数取值进行调试。剥蚀速度指数大于 1.4 后对模拟结果最小值的影响力剧增,调参时应进行微调。

(3) 水质参数:

水质参数大多对总氮模拟的最小值非常敏感。除河流反硝化作用率外,其他水质敏感参数的影响方向呈波动式变

化,调参时应尽量获取实地资料,在此基础上进行微调。

水文参数可以影响径流、泥沙及水质模拟;泥沙参数可以影响水质模拟,尤其是一些以吸附态运移为主的污染物质。因此,参数灵敏度分析和调参要有顺序性。

以上灵敏参数也是制定该流域管理方案时应当考虑的主控因子或不确定性来源。

4 结 论

灵敏度分析可以帮助识别影响模拟结果的主要因子,可以为调参工作提供指导。对作为决策支持系统的流域管理模型而言,参数灵敏度分析还有助于决策者在管理方案制定和选择时对主控因子的选择和控制风险的识别。

本文以巢湖杭埠-丰乐和流域 4 号子流域及其所含河段为例,采用局部灵敏度分析方法,分析汇流区参数、河流参数、系统参数对河段径流量、总悬浮物、总氮模拟结果的影响。通过分析,筛选出 7 个水文参数、4 个泥沙参数、6 个水质参数为敏感参数。并分析、总结这些参数的影响特征。

结合实地资料和其他地区调参经验,根据参数灵敏度分析结果对参数进行校准,径流、悬浮物、总氮的拟合结果均达到模型研究要求精度。说明参数分析结果指导参数校准有效,该模型可以在该地区进一步应用。

- [1] Joel Herr and Laura Weintraub, and Carl W. Chen, User's Guide to WARMF[R]. Systech Engineering, Inc., 3180 Crow Canyon Pl., Suite 260 San Ramon, CA 94583, 2001.
- [2] 陈欣,郭新波.采用 AGNPS 模型预测小流域磷素流失的分析[J].农业工程学报,2000,16(5):44-47.
- [3] 罗定贵,王学军,孙莉宁.水质模型研究进展与流域管理模型 WARMF 评述[J].水科学进展,2005,16(2):289-294.
- [4] Chen, C. W., J. Herr, and L.H. Z. Weintraub, Watershed Analysis Risk Management Framework: Update One: A Decision Support System for Watershed Analysis and Total Maximum Daily Load Calculation, Allocation and Implementation[R]. Palo Alto, CA: EPRI, 2001.
- [5] T. Lenhart, K. Eckhardt, N. Fohrer, H. - G. Frede, Comparison of two different approaches of sensitivity analysis [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 17: 645-654.
- [6] J. A. Huisman, L. Breuer, H. - G. Frede, Sensitivity of simulated hydrological fluxes towards changes in soil properties in response to land use change [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2004, 29: 749-758.
- [7] Mamillapalli S, Srinivasan R, Arnold J G, et al, Effect of spatial variability on basin scale modeling [M]. Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, New Mexico, January 21-26, 1996. National Center for Geographic Information and Analysis, Santa Barbara, CA, USA. <http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA-FE-CD-ROM/main.Htm>.
- [8] 徐崇刚,胡远满,常禹,姜艳.生态模型的灵敏度分析[J].应用生态学报,2004,15(6):1056-1062.
- [9] Morris MD. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics, 1991, 33: 161-174.
- [10] Cukier RI, Levine HB, Shuler KE. Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems[J]. Compute Phys, 1978, 26: 1-42.
- [11] Saltelli A. Probability and statistics series[M]. In: Chan K, Scott EM, editors. New York: Wiley, 2000.
- [12] Helton JC. Uncertainty and sensitivity analysis techniques for use in performance assessment for radioactive waste disposal[J]. Reliab Engng Syst Safety, 1993, 42: 327-67.
- [13] 窦明,谢平,李重荣,王陶.综合水质模型参数识别研究[J].重庆环境科学研究,2002,24(6):70-73.
- [14] 王建平,程声通,贾海峰.水质模型参数优化的遗传算法实现及控制参数分析[J].环境科学,2005,26(3):61-65.

(上接第 164 页)

4 结 语

面对丰乐河流域水土流失,我们只有从流域综合治理的角度

出发,总结当地多年水土保持的经验,统一领导,协调规划,遵循流域生态系统规律,以取得经济效益与社会效益的统一,从而促进流域生态系统的良性循环,为整个巢湖流域治理提供典范。

参考文献:

- [1] 李秉龙,等.六安市水利志[M].安徽省六安市,1999.167.
- [2] 李少白.舒城县水利志[M].安徽省水电局,1992.196-199.
- [3] 陈斌.巢湖流域水土流失现状、成因和综合治理对策[J].华东森林经理,2000,(4):1-4.
- [4] 辜胜阻,侯伟丽.治理长江上游水土流失的对策[J].长江流域资源与环境,2000,(2):260-264.
- [5] 孔凡文.安徽省六安市(1998-2010)水土保持规划[Z].六安市水电局,1998.206-210.
- [6] 杨则东,等.巢湖水患的地质问题[J].灾害学,2002,(9):64-66.