A cta Scientiae Circum stantiae

郑东海,王凌,曾红娟,等. 2009. 松涛水库流域非点源污染负荷模拟模型 [J]. 环境科学学报, 29(6): 1311-1320

Zheng D H, W ang I, Zeng H J *et al.* 2009. A sinulation of Non-Point Source (NPS) pollution loads in Songtao R eservoir C atchm en [ J]. A cta S cientiae C ircum stantiae, 29(6): 1311-1320

# 松涛水库流域非点源污染负荷模拟模型

郑东海1,王凌2,曾红娟1,杨胜天1\*,张翠萍2,刘阳生2

北京师范大学地理学与遥感科学学院,遥感科学国家重点实验室,环境遥感与数字城市北京市重点实验室,北京 100875
 海南省环境科学研究院,海口 570206

收稿日期: 2008-07-13 修回日期: 2008-10-27 录用日期: 2008-11-12

摘要: 对大尺度非点源污染模型进行时间步长改进, 实现溶解态模型日和吸附态模型半月时间尺度的拓展, 并选取松涛水库流域为研究对象, 应用改进的模型估算该流域 2003~2007年的非点源污染负荷, 最后结合研究区调查资料对估算结果进行验证. 研究结果表明:①流域主要污染类型为溶解态非点源污染, 溶解态 TN、TP负荷所占比重分别为 80 28% 和 72 03%;②农田 TN、TP 和 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 负荷分别占负荷总量的 45.6%、38.58% 和 40 56%, 是流域非点源污染的重要来源: 大牲畜养殖产生的非点源 COD负荷占 COD总量的 63.6%, 是流域 COD非点源 污染的重点控制对象;③农田、农村居民点和畜禽养殖产生的几种污染类型的不同指标 (COD、TN、TR、NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N)在时间和空间上均呈现出一定的分布规律, 与土地利用、降水变化规律有很强的相关性, 年内变化出现 5月份和 9月份 2个峰值, 湿季污染负荷量超过干季的 4倍;④应用 2005年研究区的调查资料验证模型结果和率定模型参数, 模型模拟结果优于原模型, 相对误差均小于 20%, 基本满足应用要求. 关键词: 非点源污染: 大尺度模型: 时间尺度拓展: 松涛水库流域: EcedIAT

文章编号: 0253-2468(2009) 06-1311-10 中图分类号: X171 文献标识码: A

# A simulation of Non-Point Source (NPS) pollution loads in Songtao Reservoir Catchment

ZHENG Dongha<sup>1</sup>, WANG Ling<sup>2</sup>, ZENG Hongjuan<sup>1</sup>, YANG Shengtian<sup>1\*</sup>, ZHANG Cuiping<sup>2</sup>, LIU Yangsheng<sup>2</sup> 1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing Normal University, Beijing 100875

2. Environmental Science Academy of Hainan Province, Haikou 570206 Received 13 July 2008 received in revised form 27 October 2008

accepted 12 November 2008

Abstract A water quality model large-scale N on-Point Source pollution model was in proved by adjusting the time step and modifying the time scale to one day for the solution module and half a month for the adhesion module. The new model was then applied at Songtao Reservoir C atchment and the Non-Point Source (NPS) pollution bads from 2003 to 2007 were calculated and validated with survey data in 2005. The results show that ① The major pollutants were soluble compounds from NPS in the Songtao Reservoir C atchment with the bads of soluble T otal N itrogen (TN) and soluble T otal Phosphor (TP) accounting for 80. 28% and 72.03% respectively. ② Fam land is an inportant source of NPS pollution, of which TN, TP and NH<sup>4</sup><sub>4</sub> -N pollution account for 45.69%, 38.58% and 40.56% respectively, while large Livestock contributed the most COD bad (63.65%) and is the larget of COD pollution control ③ The loads of COD, TN, TP and NH<sup>4</sup><sub>4</sub> -N from Fam lands. Countryside settlements and Livestock experienced temporal and spatial variations with strong correlations existing between these parameters and the land use and the precipitation. Two peaks of the pollution bads occurred in M ay and September, and the bad in wet season is more than four times of that in dry season; ④ The model was tested against the survey data in 2005, and the results show that them odified model behaves better than the origin alone with the relative error of the sinulation less than 20%, which meets the basic requirements of application.

Keywords Non-Point Source pollution, large-scale model, time scale expansion, Songtao Reservoir Catchment, EcdHAT

1 引言 (Introduction)

源污染(Diffused pollution),是指在降雨径流(包括 灌溉)的淋溶和冲刷作用下,大气、地面和土壤中的 污染物进入江河、湖泊、水库和海洋等水体而引起

Biography ZHENG Donghai (1986-), male, E-mail Zhdh023@126 con; \* Corresponding author E-mail yang-shengtan@ bnu edu en

非点源污染 (Non-Point Source pollution)或称面

基金项目:国家自然科学基金 (No 40671123);国家高技术研究发展计划 (863) (No 2006AA12Z145)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Na 40671123) and the National High-Tech Research and Development Program of China (Na 2006AA12Z145)

作者简介:郑东海(1986—),男, E-mail Zhdh023@126 com; \* 通讯作者(责任作者), E-mail yangshengtian@ bnu edu on

的水体污染 (Novotny *et al*, 1981; 李怀恩, 1987), 其 主要来源包括水土流失、农业施肥、城市径流、畜禽 养殖和农村废弃物等 (胡雪涛等, 2002).

由于非点源污染的随机性、污染物排放和污染 途径的不确定性,特别是污染负荷的时空差异性, 使得对其监测、模拟与控制面临巨大的困难,模型 模拟已成为定量研究非点源污染负荷最直接和有 效的方法(郝芳华等,2006a 2006b).近几年来,国 内外学者针对非点源污染估算开发了大量的数学 模型,主要包括统计性经验模型和机理过程模型 2 大类,统计性经验模型对基础数据需求较低,但缺 乏机理基础,区域特征的经验性也限制了模型的应 用推广(Johnes 1996 李怀恩,2000,蔡明等,2004); 机理过程模型(Lane et al, 1980,Young et al, 1989, Amold et al, 1998a, 1998b)结构复杂、变量较 多、基础数据量大、精度要求高,往往只适用于小区 域非点源污染过程的精细模拟,在大尺度非点源污 染负荷估算方面存在较大的局限性.

针对我国非点源污染产生、迁移和转化过程不 确定性明显,以及基础数据有限等情况,为满足全 国水资源综合规划对大尺度非点源污染负荷估算 的需求,郝芳华、杨胜天、程红光等在充分借鉴统计 性经验模型和机理性过程模型优势的基础上,结合 我国在非点源污染调查工作中的实际情况,建立了 具有非点源污染产生、迁移转化机理的大尺度非点 源污染负荷估算方法体系(郝芳华等,2006a 2006h 杨胜天等, 2006), 并在黄河流域、松花江流 域取得了较好的应用效果(程红光等,2006 岳勇 等, 2007). 目前, 大尺度非点源污染模型的研究主 要集中在我国九大流域(10000km<sup>2</sup>以上),模型模拟 时间单位为月,时间分辨率较低,未能反应次降雨 后剩余污染负荷的累积情况. 本文基于大尺度模型 的模拟方法,对模型的时间步长进行改造,实现大 尺度模型日和半月时间尺度的拓展,克服原模型只 能进行月尺度和年尺度模拟的不足,探讨大尺度模 型在提高时间步长和日降水过程中的模拟精度的 可行性.在研究过程中,由于尚未能获取 10000km<sup>2</sup> 以上区域数据的支持,故选用较小流域数据开展工 作,对 2003~ 2007年松涛水库流域非点源污染负荷 进行模拟,并结合流域非点源污染现状进行结果验 证和分析.

2 研究区及基础数据 (Study area and data)

21 研究区概况

松涛水库流域位于海南岛中西部少数民族地 区,流域面积为 1496km<sup>2</sup>. 地处亚热带,平均气温高、 日照长、雨量丰沛,以台风为主; 据 1971~2004年统 计资料,库区多年平均降雨量为 1875 7mm,年最大 降雨量为 2637. 8mm,最小降雨量为 1237. 5mm (海 南省白沙黎族自治县统计局, 2006). 流域内降雨量 年内分配不均,存在明显的干湿两季,11月~次年 4 月为干季,降雨量少; 5~10月为湿季,降雨丰富. 流 域内非点源污染问题较为严重,据调查,其非点源 污染主要来自 3个方面:一是农业生产中不合理使 用而流失的化肥、农药; 二是农村生活污水和垃圾; 三是分散式畜禽养殖废水,流域内多为农户为主的 小规模养殖,大部分养殖废水直接外排.

2 2 基础数据及预处理

基础数据包括松涛水库流域 2005年 30m 空间 分辨率的 Landsatt 5影像数据,通过监督分类法从 影像上提取流域土地利用图,采用像元二分模型反 演植被盖度图 (李苗苗, 2003): 1:100000DEM 数据、 土壤类型图和流域乡镇界线图,利用 Ard IS软件从 DEM 数据提取坡度图:以及白沙气象局提供的 2003 ~ 2007年日降水数据和 2005年社会经济统计资料 (包括人口、产业状况、GDP、畜禽养殖、农业种植面 积)(海南省白沙黎族自治县统计局,2006),利用 分区密度图法进行人口和畜禽养殖数量的空间离 散化 (李素等, 2006). 此外, 为获取氮磷养分平衡, 通过田间调查获取流域主要农作物化肥、农药使用 情况以及作物生长信息,现场采集土壤、植被样本 进行测试、获取不同土壤类型、作物样本的氮、磷含 量,利用总量平衡的方法计算农田氮磷养分平衡并 讲行空间离散化.

参考国家环保总局《中国环境经济核算技术指 南》和《全国水环境容量核定技术指南》估算各污染 类型的排放量,作为大尺度非点源污染模型模拟结 果的验证基础.

1) 农田

$$Q = \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{m} A_{i}^{\bullet} \omega_{ij}^{\bullet} M \qquad (1)$$

式中, Q 为农田产生的非点源污染物排放总量; *i*为 作物类型, 主要包括橡胶林、水田和旱地 3种类型, *n* 为类型数; *j* 为污染物指标类型, 主要包括总氮、总磷 和氨氮 3种类型, *m* 为类型数; *A* 为作物种植面积, 通过白沙 2006年统计年鉴获取;  $\omega_{ij}$ 为各种作物不同 污染物指标的源强系数,标准农田源强系氨氮取值  $2 \text{ kg} \text{ m}^{-1} \text{ e}^{-1}$ ,总氮取值  $6 \text{ kg} \text{ m}^{-1} \text{ e}^{-1}$ ,总磷取值  $0 6 \text{ kg} \text{ m}^{-1} \text{ e}^{-1}$ ,橡胶林源强系数取标准农田源强 系数的 25%; *M* 为修正系数,包括坡度、土壤、化肥 和降水量修正,分别取值 1.3,07,10和 1.5(海南 省环境科学研究院, 2007).

$$Q = \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{m} C_{i} \cdot D_{i} \cdot k_{i} \cdot \omega_{j} \cdot \eta_{ij} \qquad (2)$$

式中, Q 为畜禽养殖产生的非点源污染物排放总量; i为畜禽养殖类型, 主要包括牛、猪、羊和家禽 4种类 型, n 为类型数; j 为污染物指标类型, 主要包括总 氮、总磷、COD和氨氮 4种类型, m 为类型数; C 为畜 禽数量, 通过白沙 2006年统计年鉴获取; D 为不同 畜禽类型饲养周期, k 为不同畜禽类型粪便排泄指 数, ω<sub>i</sub> 为不同畜禽类型不同污染物指标的源强系 数, n<sub>i</sub>为不同畜禽类型不同污染物指标的流失率, 参数取值见表 1(海南省环境科学研究院, 2004).

		Tab	le1 Parameters of Lives	tock pollution estimation M	A odel	
	- =1	排泄指数 /	饲养周期 /	COD源强 /	TN 源强 /	TP源强 /
类型		( kg d <sup>-1</sup> )	d	( kg t <sup>-1</sup> )	$(kg t^{-1})$	$( kg t^{-1} )$
4	粪	20	365	226 3	31. 9	8. 61
	尿	10		21 9	29. 2	1. 46
猪	粪	2 0	199	20 7	2.34	1. 36
	尿	3 3		5 91	2.17	0.34
羊		2 6	365	4 4	2. 28	0. 45
家禽		0 125	210	1 165	0. 275	0. 115
类型		NH <sub>4</sub> -N 源强 / (kg f <sup>-1</sup> )	COD流失率	TN流失率	TP流失率	NH <sub>4</sub> -N 流失率
4	粪	12 48	6. 16%	5 68%	5. 5%	2. 22%
	尿	12 67	50%	50%	50%	50%
猪	粪	1. 23	5. 58%	5 34%	5. 25%	3. 04%
	尿	0 84	50%	50%	50%	50%
羊		0 57	5. 50%	5 3%	5. 2%	4. 10%
家禽		0 125	8. 59%	8 47%	5. 12%	4. 15%

表 1 畜禽养殖产生的非点源污染估算模型参数取值

3) 农村居民点

$$Q = \sum_{j} P \bullet \omega_{j} \tag{3}$$

式中, Q 为农村居民点产生的非点源污染物排放总 量; j为污染物指标类型,主要包括总氮、总磷、COD 和氨氮 4种类型, m 为类型数; P 为人口数量,通过 白沙 2006年统计年鉴获取;  $\omega_j$ 为不同污染物指标的 源强 系 数,总 氮、总 磷、COD 和 氨 氮 分 别 取 值 0.002kg 人<sup>-1</sup>·年<sup>-1</sup>、0.0002kg 人<sup>-1</sup>·年<sup>-1</sup>、0.0128 kg 人<sup>-1</sup>·年<sup>-1</sup>和 0.0012kg 人<sup>-1</sup>·年<sup>-1</sup>(海南省环境科 学研究院, 2007).

3 计算原理与方法 (M ethods)

3.1 模型原理

根据非点源污染迁移转化规律,分别计算溶解 态污染负荷和吸附态污染负荷 2种过程.

 溶解态污染负荷模型:溶解态污染负荷采用 二元结构模型(郝芳华等,2006a),综合考虑社会、 自然二元因子的影响,按农田、农村居民点、畜禽养 殖(大牲畜、小牲畜)几种类型计算.原模型通过月 降水量与三级水文分区的降水参数比较计算月降 水次数,未能真实反映日降水过程对非点源污染的 影响,且模型未考虑降水冲刷后剩余污染物的累积 过程,本文对原模型进行了时间尺度拓展,并考虑 了剩余污染物的累积过程,公式如下:

$$C = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0}} \times (1 - e^{-iRt}) \times (Q_{i} + L_{i}) \times N_{i} \times S_{b} P \ge R\\ 0 P < R \end{cases}$$

$$(4)$$

式中, *C* 为污染负荷 (  $t a^{-1}$ ); *i* 为溶解态污染类型, *n* 为类型数; *Q*<sub>i</sub>为污染源强 (  $t a^{-1}$ ), 通过 2 2节方 法计算获取; *L*<sub>i</sub>为次降水冲刷后剩余污染物的量, 为污染源强和污染负荷的差值; *k* 为地面冲刷系数, 模型取值 0 18 *P* 为日降雨量, *R* 为标 准雨强 (mm• h<sup>-1</sup>), 模型取值 12 7;  $\varepsilon$ 为径流系数, 模型取 值 0 6;  $\varepsilon_0$ 为标准径流系数, 反映不透水硬化地面, 模型取值 0 87; *N*; 为自然因子修正系数, 如坡度、植 被覆盖和土壤等因子; *S*; 为社会因子修正系数, 反映

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(5)

## 社会发展程度对非点源污染源强的削弱程度.

$$N = \text{slop}_{co} \bullet \text{vegcover}_{co}$$
(5)  
$$s \log_{co} = \frac{\text{slop} - \text{slop}_{n \text{ in}}}{\text{slop}_{nax} - \text{slop}_{n \text{ in}}}$$
(6)

$$\operatorname{egcover}_{\omega} = \frac{\operatorname{vegcover}_{\operatorname{in} ax} - \operatorname{vegcover}}{\operatorname{vegcover}_{\operatorname{in} ax} - \operatorname{vegcover}_{\operatorname{in} ax}}$$
(7)

$$S = (1 - W) \times (1 - U)$$
 (8)

式中, slop<sub>m</sub>, vegcover<sub>m</sub>分别为坡度、植被覆盖度修正 系数; slop\_ax slop\_i和 slop分别表示区域最大坡度、 最小坡度和计算单元坡度; vegcovernax vegcovernin和 vegcover分别表示区域最大植被覆盖度、最小覆盖 度和计算单元植被覆盖度: W和 U分别表示垃圾处 理率和非点源污染物进入管网的比例.根据松涛水 库流域各乡镇的垃圾处理能力和管网情况,模型取 值为 0.

2) 吸附态污染负荷模型:吸附态非点源污染负 荷基于简化 USLE 方程,采用吸附态污染负荷模型 (杨胜天等, 2006)计算,并采用章文波等 (2002)利 用日雨量计算降雨侵蚀力的成果改进原模型降雨 侵蚀力的计算,弥补原模型只能进行年十壤侵蚀计 算的不足,公式如下:

$$C_a = X \times Q_a \times \mathfrak{N} \tag{9}$$

式中,  $C_a$ 为吸附态污染负荷 (  $\mathbf{t} = \mathbf{a}^{-1}$ ); X 为土壤侵蚀

 $= (\mathbf{t} | \mathbf{a}^{-1}); O_a$ 为吸附态污染源强 ( $\mathbf{t} | \mathbf{t}^{-1} | \mathbf{a}^{-1}), 通过$ 田间调查获取的不同土壤类型氮磷含量计算: 几为 吸附态污染物富集系数.

$$X = K_{\rm USLE} G_{\rm USLE} \tag{10}$$

$$K_{\text{USLE}} = \alpha \sum_{i=1}^{n} (p_i)^{\beta}$$
(11)

$$h\eta = 2 - 0 2 hX$$
 (12)

式中,  $K_{\text{USLE}}$ 为半月时段的降雨侵蚀力因子;  $G_{\text{USLE}}$ 为 下垫面因子,采用原模型的计算方法:k为半月时段 内的天数, P<sub>i</sub>为半月时段内第 j 天的侵蚀性日雨量, α, β为模型参数,分别取值 4,44和 1,256

32 模拟方法

为探讨大尺度模型在提高时间步长和日降水 过程中的模拟精度的可行性,对大尺度模型进行时 间步长的改进,降水输入数据为日降雨资料,降雨 侵蚀力因子数据为半月降雨侵蚀力因子数据,将每 次降雨冲刷后的剩余污染物负荷累加到雨后第 1天 排放的污染负荷中,使模型模拟更符合实际情况, 从而实现溶解态污染负荷的日尺度模拟和吸附态 污染负荷的半月尺度模拟,克服原来溶解态污染负 荷模型只能进行月尺度模拟,以及吸附态污染负荷 只能进行年尺度模拟的不足,以期使模型模拟的时 间分辨率有较大的提高.具体计算流程见图 1. 首



图 1 松涛水库流域非点源污染负荷匡算流程图

#### Fig 1 Routine of estimation of Non-Point Source pollution in Songtao Reservoir Catchment

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

v

先, 根据基础数据确定模型参数和计算植被盖度、 坡度等因子,构建模型数据库;然后利用拓展了时 间尺度的大尺度模型分别计算溶解态和吸附态污 染负荷.根据调查数据和已有研究成果验证模型的 可靠性,率定模型参数.模型模拟基于 ENV I/DL编 程环境,并耦合到自主研发的 EcdHAT (生态水文评 价系统)软件中,计算 2003~2007 年松涛水库流域 的非点源污染负荷,进行模拟结果的统计与分析. E coHAT软件 (2008SR 06938) 为区域尺度的分布式 生态水文模拟系统,集成了 RS/G B技术的空间信 息获取、管理和分析功能,耦合了具有物理化学机 制的生态水文过程模型,能够为生态效益评价、生 态设计、生态流域等一系列流域可持续管理问题提 供科学分析工具.

33 模型数据库

非点源污染负荷数据库包括植被盖度图、土壤 类型图、土地利用图、DEM、坡度图、大/小牲畜分布 图、人口分布图和平衡后的农田总氮 总磷分布图、 以及降水数据等.数据统一为 GCS Pulkovo 1942 坐标系统, Transverse Mercator投影, 90m分辨率.

4 模型参数率定和验证 (Parameters calibration and model validation)

根据 2005年松涛水库流域详细的实地调查资 料,利用土壤、植被样品测试结果率定模型参数,并 结合 2 2节的估算结果验证模型模拟结果.

41 模型参数率定

通过流域内非点源污染类型划分决定参数分 类,然后根据文献资料、典型区调查和现场实验的 结果率定模型参数.参考大量文献资料(章文波等, 2002 陈利顶等, 2002 郝芳华等, 2006c 杨水文等, 2007).结合 2005年松涛水库流域实地调查成果.流 域二元结构模型参数取值见表 2

表 2 二元结构模型参数取值

Table 2 Parameters of B nary Structure M od e										
类型	源强 / (kg d <sup>-1</sup> )	垃圾 累积率	标准径流 系数	径流 系数	地面冲刷 系数	标准雨强 / (mm• h <sup>-1</sup> )	TN 系数	TP系数	COD 系数	NH₄-N <b>系数</b>
农田	-	0 05	0 87	0 1-0 6	0 18	12 7	0 074	0 0047	0 148	0 394
农村居民点	0 5	0 05	0 87	06	0 18	12 7	0 007	0 0065	0 035	0 541
大牲畜	1 0	0 037	0 87	0 6	0 18	12 7	0 016	0 0009	0 054	0 482

12 7

0 049

0 18

注:农田的源强为平衡后的总氮 总磷量,径流系数取值依据土壤类型而定,取值范围介于 0 1~06

0.6

0.87

4.2 结果验证

0.2

小牲畜

对于溶解态污染负荷,将 2005年模型计算结果 与实地调查资料进行对比分析(表 3). 由表 3可

0.037

知,各种类型 TN、TP、NH $_{4}^{+}$ -N 和 COD的模拟效果不 同,原模型(郝芳华等,2006a)的模拟结果偏小,改 进模型的相对误差均小于 20%,模拟结果较好.

0 054

0 4 8 2

0 0054

表 3 2	005年溶解态污染负荷模拟结果验证
-------	-------------------

Table 3 Comparison between smulation and survey of soluble pollution load											
			TN			COD					
- * 刑	`四本/=	原植	莫型	改进	模型	四本住	原植	莫型	改进	<b></b> 模型	
关型	调笪 <u></u> 值 / t	模拟值 /t	相对误差	模拟值 / t	相对误差	调宣值 - /t	模拟值 /t	相对误差	模拟值 /t	相对误差	
农田	2585 72	2055 67	20 50%	2299.85	11. 06%	-	-	-	-	-	
农村居民点	194 90	205 29	5 33%	210. 31	7.90%	1200 40	1026.47	14. 49%	1051 57	12. 40%	
畜禽养殖	2700 00	2306 69	14 57%	2467.10	8. 63%	5800 00	4998.12	13. 83%	5345 70	7. 83%	
			TP			NH <sup>+</sup> <sub>4</sub> –N					
- * 刑	油木体	原格	原模型		改进模型		原模型		改进模型		
尖型	调宣值 /t	模拟值 /t	相对误差	模拟值 / t	相对误差	调宣阻 /t	模拟值 /t	相对误差	模拟值 /t	相对误差	
农田	165 06	130 56	20 9%	146.07	11. 50%	1026	809 93	21. 06%	906.14	11. 68%	
农村居民点	18 00	19 06	5 89%	19. 53	8. 50%	120	111.06	7. 45%	113. 78	5. 18%	
畜禽养殖	240 00	195 88	18 38%	209.50	12.70%	1000	1111 69	11. 17%	1189.00	18.9%	

注:模型模拟的畜禽养殖结果为大牲畜和小牲畜模拟结果之和.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对于吸附态污染负荷, 采用文献比较法进行验证. 根据杨胜天等的研究, 珠江流域吸附态 TN 和吸附态 TP 单位面积流失量分别为 0 53 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>和 0 095 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, 东南诸河吸附态 TN 和吸附态 TP 单位面积流失量分别为 0 32 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>和 0 023 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>(杨胜天等, 2006). 利用改进模型计算得到, 松涛流域与珠江流域、东南诸河地域上相近, 流域单位面积吸附态 TN 和 TP流失量分别为 0 4356 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>和 0 05324 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, 模型模拟结果介

于珠江流域和东南诸河结果之间,模拟结果比较 合理.

综合上述分析,改进后模型的模拟效果及模型 参数选取基本满足应用要求.

5 讨论 (Discussion)

利用改进后的模型分别计算松涛水库流域 2003年~2007年溶解态和吸附态 TN、TP和 COD、 NH<sup>4</sup>-N 的负荷量,以及土壤侵蚀量(表 4).

表 4 松涛水库流域 2003年~2007年平均非点源污染负荷量

Table 4 Average load of Non-Point Source pollution in Songtao Reservoir Catchment from 2003 to 2007

_	溶解态污染负荷								吸附态污染负荷 / t		土壤侵
污染类型	NH <sup>+</sup> <sub>4</sub> –N		COD		TN		TP				蚀量 /
-	负荷 / t	比例	负荷 /t	比例	负荷 / t	比例	负荷 /t	比例	IN	IP	$10^4 t$
农田	764 08	40 56%	-	-	1939 30	45 69%	123 17	38 58%	971.85	118 78	10. 798
农村居民点	79 65	4 23%	736 12	13. 50%	147. 22	3 40%	13 67	4 28%			
大牲畜	495 61	26 31%	3470 28	63. 65%	1028 23	24 22%	57.84	18 12%			
小牲畜	544 73	28 90%	1245 46	22. 85%	1130 14	26 62%	124 55	39 02%			

5.1 非点源污染类型比较

本研究中考虑了农田径流、农村居民点和畜禽养殖(包括大牲畜和小牲畜)几种类型的非点源污染,结果显示,不同类型所对应的污染负荷及各种类型所占污染负荷总量的比例差别较大(表 4).由表4可知,农田径流的TN、TP和NH<sup>4</sup>-N非点源污染负荷分别占污染负荷总量的45.6%、38.58%和40.56%,大于其它几种类型的非点源污染负荷,是流域内非点源污染的重要来源.农村居民点、畜禽养殖产生的非点源污染物以COD为主,除农田外,大牲畜的COD污染负荷占污染负荷COD总量的63.65%,是流域COD非点源污染的重点控制对象.

松涛水库流域 2005年实地调查资料显示,流域 内化肥总施用量为 9504t 其中氮肥 4238t 磷肥 2101t 平均化肥施用率 360kg\* hm<sup>-2</sup>;农业种植类型 以橡胶为主,其次为水稻.近几年来,流域内非法毁 林现象比较严重,水源林遭受大面积破坏,导致农 田中的营养元素随降水径流直接进入水库.库区畜 禽养殖产生的污染物基本未进行控制和治理,加剧 了水库的污染.此外,水区周边乡镇尚无生活污水 收集处理系统,居民生活污水基本处于散排状态; 生活垃圾利用率极低,大部分露天堆放于城郊和乡 村,在降水冲刷作用下,其渗漏液污染地表水和地 下水导致生态环境恶化. 5.2 非点源污染时间分布特征

非点源污染负荷在时间上具有很强的随机性 和间歇性,在降雨-径流-产污过程中,随年际降水量 和水文期(丰、平、枯)而变化,从长时间序列看,仍 呈现一定的规律性(图 2和图 3).由图 2可知,农 田、农村居民点和畜禽养殖产生的几种污染类型不 同污染指标的污染负荷年际变化规律相似,与降水 变化呈很强的相关性,降雨多的年份(2005年)产生 的污染负荷大,反之,污染负荷小.

由图 3可知,农田、农村居民点和畜禽养殖产生的污染负荷年内各月变化具有一定的规律性,呈现 2个峰值,分别出现在 5月和 9月,与流域内降水变化规律一致. 2003 ~ 2007 年平均降雨量仅为 399.8mm,占全年降雨量的 17.26%;5~10月为湿季,降雨量为 1917.1mm,占全年降雨量的 82.74%;其中 7~9月降雨量为 1223.5mm,占全年降雨量的 52.81%.加之 5月~10月农作物多处于生长期,施肥量及频率一般较大,导致营养物质大量流失,非点源污染较为严重.流域非点源污染负荷干湿季变化情况如表 5所示.

由表 5可知,流域内不同污染指标的污染负荷 干湿季变化规律相同,湿季污染负荷量超过干季的 4倍,7~9月污染负荷量约占全年的 1/2







图 3 2003~2007年松涛水库流域平均非点源污染负荷月分布图



Table 5 Comparison between different types of pollution indicators between Wet and Dry Season								
) (h, +b+=	干季	5	湿者			7~9月		
污柴指标	负荷量 /t	比例	负荷量 /t	比例	负荷量 / t	比例		
TN	922 48	18. 53%	4054 81	81 47%	2423. 54	48 69%		
TP	70 00	18. 66%	305 13	81 34%	183. 70	48 97%		
CO D	1270 62	19. 86%	5126 69	81 14%	3122. 22	48 81%		
NH <sup>+</sup> <sub>4</sub> –N	412 49	18. 67%	1796 59	81 33%	1077.07	48 76%		

b. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N

表 5 不同污染指标干湿季变化情况

## 5.3 非点源污染空间分布特征

松涛水库流域非点源污染负荷空间分布如图 4 所示.由图 4可以看出,流域非点源污染负荷分布范 围广泛,COD的分布与流域居民点的空间分布显著 相关,较高负荷主要分布在人口较为集中的中部地 区,该区域人口、畜禽养殖数量较多,非点源污染比 较严重,COD负荷较高;TN、TP和 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 的分布与 流域农田的空间分布显著相关,较高负荷主要集中 于中部和西南区域,这些区域耕地覆盖面积较大,

a. COD

以农业生产为主,伴随化肥和农药施用量的逐渐增加及水土流失等原因,未被吸收利用的氮、磷流失 严重,造成这些区域 TN、TP和  $NH_4^+$  -N 的高负荷分 布.从整个流域来看,各类污染物的非点源污染负 荷在全流域范围内空间变异较小,COD、 $NH_4^+$  -N、TN 和 TP负荷分别为 0~0 03t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>、0~0 12 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>、0~0 2t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>、0~0 02t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>.



Fig 4 Spatial distribution of average NPS loads in the Songtao Reservo ir Catchment from 2003 to 2007

### 5.4 不同形态非点源污染比较

松涛水库流域水土流失主要发生在水库周边 区域,这主要是由于水源地周边植被近几年来遭到 不同程度的毁坏,一些区域林地逐渐被橡胶园所取 代;但从整个流域来看,水土流失并不严重,平均土 壤侵蚀强度为 484t° km<sup>-2</sup>,侵蚀强度普遍小于 567.9 t km<sup>-2</sup>;吸附态 TN、吸附态 TP负荷空间分布 趋势相同,变化介于 0~0 21 t km<sup>-2</sup>和 0~0 025 t km<sup>-2</sup>.对不同形态的 TN、TP非点源污染负荷量进 行了比较分析,结果见表 6 由表 6 可知,溶解态的 TN 负荷远远高于吸附态的 TN 负荷,溶解态的 TP 负荷略高于吸附态的 TP 负荷,流域主要污染类型 为溶解态非点源污染.

表 6 溶解态和吸附态 TN、TP负荷量比较

Table 6	Com parison	between	so lub le ar	nd ad sorp tive	bad of TN, TP
---------	-------------	---------	--------------	-----------------	---------------

法沈华特	溶解	态	吸附态			
万米相称	负荷量 /t	比例	负荷量 /t	比例		
TN	4977. 28	80 28%	1191.64	19. 32%		
ТР	375 13	72 03%	145. 64	27. 97%		

大尺度非点源污染模型仍有待验证和完善,如 不同研究区模型数据库的构建和参数的率定、不同 污染类型地面冲刷系数的实验设计与获取等.此 外,模型仅从产污角度对非点源污染负荷进行了估 算,对于污染物迁移、转化过程的认识,仍需开展更 深入的研究.

6 结论 (Conclusions)

 1) 对大尺度模型进行了时间步长改进,实现了 溶解态污染负荷的日尺度模拟和吸附态污染负荷 的半月尺度模拟,克服了原模型只能进行溶解态污 染负荷月尺度、吸附态污染负荷年尺度模拟的不 足,模型模拟的时间分辨率和模拟精度有了较大的 提高,模型模拟结果优于原模型.

 2) 结合实地调查资料, 验证模型模拟结果, 率 定模型参数, 结果表明模型的模拟效果及模型参数
 选取基本满足应用要求.

3) 对 2003年~2007年松涛水库流域非点源污 染负荷进行模拟,结果表明: 流域主要污染类型为 溶解态非点源污染,农田是重要的污染来源,大牲 畜是 COD非点源污染的重点控制对象;2003~2007 年农田、农村居民点和畜禽养殖产生的几种污染类 型不同污染指标的污染负荷年际变化规律相似,年 内各月变化呈现 2个峰值,分别出现在 5月份和 9 月份,均与降水变化规律呈现很强的相关性;流域 内非点源污染负荷干湿季差异大,湿季污染负荷量 超过干季的4倍;7~9月污染负荷量约占全年的1/ 2,流域内非点源污染负荷空间分布范围广泛,各类 污染物的非点源污染负荷在全流域范围内空间变 异较小,与土地利用呈现一定的相关性,COD较高 负荷主要分布在人口较为集中的中部地区.

4) 从模型模拟结果看,大尺度模型能够较好地 估算非点源污染负荷,且具有一定的机理基础,结 构简单,所需基础数据易于获取,便于推广,是非点 源污染负荷估算、评价较适宜的模拟工具.

**责任作者简介**:杨胜天 (1965—),男,教授,博士.主要研究 方向:自然地理、遥感和环境科学. E-mail yangshengtian@ bnu edu cn,电话: 58805034.

#### 参考文献 (References):

- A mold J G, Srinivasan R, Muttiah T S, *et al.* 1998a Large area hydrobgic modeling and assessment part I model development[J]. J AW RA, 43(1): 73-89
- A mold J G, Srinivasan R, Muttiah T S, *et al.* 1998b. Large area hydrobgic modeling and assessment part H model Application [J]. J AW RA, 43(1): 91-101
- 蔡 明, 李怀恩, 庄咏涛, 等. 2004. 改进的输出系数法在流域非点源 污染负荷估算中的应用 [J].水利学报, (7): 40-45
- CaiM, LiHE, Zuang YT, *et al.* 2004 Application of modified export coefficientmethod in polluting load estimation of non-point source pollution[J]. Journal of Hydraulic Engineering (7): 40-45( in Chinese)
- 陈利顶,傅伯杰,张淑荣,等.2002 异质景观中非点源污染动态变 化比较研究 [J].生态学报,22(6):808-816
- Chen L D, Fu B J Zhang S R, *et al.* 2002 Comparative study on the dynam ics of non-point source pollution in a heterogeneous kind scape [J]. A cta Eco bg ica Sinica, 22(6): 808-816(in Chinese)
- 程红光, 岳勇, 杨胜天, 等. 2006 黄河流域非点源污染负荷估算与 分析 [J]. 环境科学学报, 26(3): 384-391
- Cheng H G, Yue Y, Yang S T, *et al* 2006 An estimation and evaluation of non-point source pollution in Yellow River Catchment [J]. A cta Scientiae Circum stantiae, 26 (3): 384–391 (in Chinese)
- 海南省白沙黎族自治县统计局. 2006. 白沙统计年鉴 (2006) [M]. 白沙: 白沙黎族自治县统计局

Bureau of statistics of Baisha LiAutonom ous County of Hainan Province 2006. Statistica IY earbook of Baisha (2006) [M]. Baisha Bureau of statistics of Baisha LiAutonomous County(in Chinese)

海南省环境科学研究院. 2004 海南省畜禽养殖业污染情况调查及防 治对策 [R]. 海口: 海南省环境科学研究院

Environmental Science Academy of Hainan Province 2004 Survey and prevention study of livestock pollution in Hainan province [R].

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Hakou Environmental Science Academy of Hainan Province 海南省环境科学研究院. 2007. 松涛水库集雨区面源污染调查及对策

# 研究 [ R]. 海口: 海南省环境科学研究院

- Environmental Science Academy of Hainan Province 2007. Survey and prevention study of non-point source pollution in the Songtao Reservoir Catchment[R]. Haikou: Environmental Science Academy of Hainan Province
- 郝芳华,杨胜天,程红光,等. 2006a 大尺度区域非点源污染负荷
  估算方法研究的意义、难点和关键技术 [J].环境科学学报. 26
  (3): 362-365
- HaoFH, Yang ST, ChengHG, et al 2006a The significance difficulty and key technologies of large scale model applied in estimation of non-point source pollution [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 26(3): 362-365(in Chinese)
- 郝芳华,杨胜天,程红光,等.2006b.大尺度区域非点源污染负荷计
   算方法 [J].环境科学学报,26(3):375-383
- HaoFH, ChengHG, YangST, et al 2006b A method for estimation of non-point source pollution load in the large-scale Catchments of China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 26(3): 375–383 (in Chinese)
- 郝芳华,程红光,杨胜天.2006c 非点源污染模型 理论方法与应用 [M].北京:中国环境科学出版社,445
- HaoFH, YangST, ChengHG. 2006c Non-point source pollution model Methods and Application [M]. Beijing China Environmental Science Press, 445(in Chinese)
- 胡雪涛, 陈吉宁, 张天柱. 2002 非点源污染模型研究 [J]. 环境科 学, 23(3): 124-128
- HuXT, Chen JN, ZhangTZ 2002. A study on non-point source pollution models[J]. Environmental Science 23(3): 124-128 (in Chinese)
- Johnes P J 1996 Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters the export coefficient modeling app roach [J]. Journal of Hydrology, 183 323-349
- Lane L J NearingM A, Stone J J et al. 1980 CREAMS-A field scale model for chemical nunoff and erosion from agricultural management systems [R]. Conservation Research Report NO. 26 USDA, 36-64
- 李怀恩. 1987 水文模型在非点源污染研究中的应用 [J]. 陕西水利, (3): 18-23
- LiH E 1987. A pplication of hydrological model in non-point source pollution[J]. ShanxiWater Resources (3): 18-23(in Chinese)
- 李怀恩. 2000 估算非点源 污染负荷的平均浓度 法及其应用 [J]. 环 境科学学报, 20(4): 397-400
- LiH E, 2000 M ean concentration method for estimation of non-point source bad and its application [J]. Acta Scientiae Circum stantiae 20(4): 397-400(in Chinese)

- 李苗苗. 2003. 植被覆盖度的遥感估算方法研究 [D]. 中国科学院遥 感应用研究所硕士学位论文, 1-98
- LiM M, 2003 Estimation method of vegetation cover based on remote sensing Chinese A cademy of Sciences Institute of Remote Sensing Applications 1-98( in Chinese)
- 李素, 庄大方. 2006 基于 RS和 GIS的人口估计方法研究综述 [J]. 地理科学进展, 25(1): 109-121
- LiS Zuang D F, 2006. A review on RS- and G IS- based population estimation methods [J]. Process In Geography, 25 (1): 109–121 (in Chinese)
- Novon my V, Chesters G, 1981. Handbook of Non-point Pollution: Sources and Management[M]. New York V an Nostrand Reinhold, 555
- 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 2004 海南岛生态系统土壤保持空间 分布特征及生态经济价值评估 [J]. 生态学报, 20(4): 552-558
- XiaoH, OU Y Z Y, Zhao J ZH, et al 2004. The spatial distribution characteristics and eco-economic value of soil conservation service of ecosystems in Hainan Island[J]. A cta E cologica Sinica, 20(4): 552-558 (in Chinese)
- 杨胜天,程红光,步青松,等.2006 全国土壤侵蚀量估算及其在吸 附态氮磷流失量匡算中的应用[J].环境科学学报,26(3): 366-374
- Yang S T, Cheng H G, Bu Q S, et al 2006 Estimation of soil erosion and its application in assessment of the absorbed nitrogen and phosphorus load in China[J]. A cta Scientiae Circumstantiae, 26 (3): 366-374 (in Chinese)
- 杨水文,王里奥,岳建华,等.2007 海南省松涛水库流域生活垃圾 产生特征和现状 [J].重庆大学学报 (自然科学版),30(9): 123-126
- Yang SW, Wang LA, Yue JH, et al 2007. R esearch of character and actuality of msw in songtao reservoir region, Hainan province[J]. Jou mal of Chongqing University (Natural Science Edition), 30(9): 123-126 (in Chinese)
- Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. 1989 AGNPS: A nonpoint source pollution model for evaluating agricultural water sheds [J]. So ilW ater Conserve, 44(2): 168–173
- 岳勇,程红光,杨胜天,等.2007.松花江流域非点源污染负荷估算 与评价[J].地理科学,27(2):231-236
- Yue Y, Cheng H G, Yang S T, et al. 2007. Integrated assessment of non-point source pollution in Songhuajiang river Catchment [J]. Scientia G eographica Sicica, 27(2): 231-236 (in Chinese)
- 章文波,谢云,刘宝元.2002.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研 究[J].地理科学,22(6):705-711
- Zhang W R, Xie Y, Liu B Y. 2002 Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts [J]. Scientia Geographica Sicica 22(6): 705-711(in Chinese)