

流域非点源污染控制决策支持系统

杜鹏飞, 宋科, 张大伟, 石峰, 陈吉宁

(清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 为给非点源污染的控制与管理提供集成和高效的支持, 开发了决策支持系统。采用 Visual C++ 编程语言和 ActiveX 组件技术进行二次开发, 该系统应用地理信息系统(GIS)技术实现农业非点源模型(AGNPS)的输入数据准备和输出结果分析等功能, 调用筛选模块生成较优的非点源污染控制技术组合集。以官厅水库崇礼县小流域为背景对系统进行了评估和应用。研究表明: 决策支持系统增强了模型在流域尺度上的模拟和预测能力, 并能为非点源污染控制管理提供有力的决策支持。

关键词: 环境保护和管理; 非点源(NPS); 决策支持系统; 农业非点源模型(AGNPS); 地理信息系统(GIS)

中图分类号: X 3 文献标识码: A
文章编号: 1000-0054(2003)10-1343-04

Watershed non-point source pollution control decision support system

DU Pengfei, SONG Ke, ZHANG Dawei, SHI Feng, CHEN Jining

(Department of Environmental Science and Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A decision support system was developed to provide an integrated and efficient approach to aid decision making for non-point source pollution control and management. The platform was developed using Visual C++ and ActiveX control, including geographic information system capabilities to handle data preparation for an agricultural non-point source (AGNPS) model and result analysis. A management model was built to efficiently screen non-point pollution control plans. The Chongli Catchment in the Guanting Reservoir Watershed was analyzed using the system. The coupled system greatly improves the model's simulation and forecasting ability at the watershed level and provides powerful decision support for non-point source pollution control and management.

Key words: environmental protection and management; non-point source (NPS); decision support system; agricultural non-point source (AGNPS); geographic information systems (GIS)

水质的恶化, 近 20 年来完全丧失了饮用水供水功能。根据官厅水库上游流域非点源污染调查技术报告^[1], 农业非点源污染负荷约占官厅水库总污染负荷的 1/4, 主要来源是严重的水土流失、化肥和农药的不合理施用以及畜禽养殖业所产生的 COD 和 N、P 排放。2001 年, 清华大学承担了官厅水库流域非点源污染控制规划与管理决策支持系统课题。本文是该研究的组成部分之一。文中所讨论的非点源均指农业非点源。

1 决策支持系统简介

决策支持系统的开发: 前台采用 Visual C++ 6.0 和 ESRI ArcObject 组件技术, 后台采用 Microsoft Access 2000 管理数据库。整个系统分为 3 层结构: 最底层是由流域信息数据库、控制技术数据库和负荷模型数据库提供基础数据; 系统结构的第二层为问题求解子系统, 包括流域信息读取模块、技术组合生成模块、模型库接口模块和结果筛选模块 4 部分, 是决策支持系统求解具体决策的核心部分; 最后一层的图形界面是用户与决策支持系统之间的接口部分。系统结构如图 1 所示。

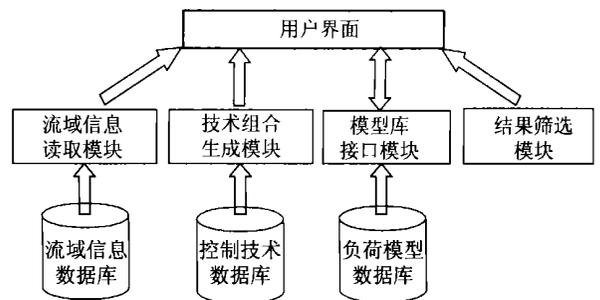


图 1 决策支持系统结构图

收稿日期: 2002-12-04

基金项目: 水利部重大科技专项项目(9550610400)

作者简介: 杜鹏飞(1970-), 男(汉), 辽宁, 副教授。

E-mail: dupf@tsinghua.edu.cn

官厅水库曾是北京的重要水源地。但由于水库

对农业非点源(A GN PS)模型 5.0 版本的源程序重新编译后作为系统的子函数进行调用,采用多线程技术开发,大大提高了程序运算效率。A GN PS 模型是一种基于网格单元的分布式参数模型,由美国农业部(USDA)、土壤保持中心(Soil Conservation Service)和明尼苏达州污染控制局(Minnesota Pollution Control Agency)共同开发的,用于估算农业流域地表径流水质的计算机化的模型^[2]。模型包括了降雨径流、土壤侵蚀和污染物迁移转化 3 个组成部分。模型的输入参数可按尺度分为 2 类: 1) 流域统一的参数,包括基本单元格面积、降雨量、降雨能量强度、前期土壤湿度等; 2) 各网格单元的参数,包括土地利用、土壤类型、径流曲线数、坡度、坡长、土壤可蚀性因子和侵蚀控制措施因子等 22 个参数。模型计算结果不但给出了整个流域的径流量、泥沙流失和各种污染物的输出量,还详细列出了各个单元格的污染物产生情况。

以流域模型为基础的非点源污染模型大都比较复杂,参数众多,同时需要大量的数据输入。分布参数模型在大尺度流域应用中的输入数据准备和输出结果分析是模型使用者所面临的最大困难,解决这个问题需要引入一种统计学和地理学结合的手段,GIS 技术与分布参数模型结合即是基于这样一种思想^[3]。同时,由于传统的 GIS 技术局限于在数据的存储、管理、显示和空间分析等方面对非点源模型提供支持,决策支持系统(DSS)与 GIS 的集成应用使模型的功能大大增强,进一步的开发将使系统成为流域水资源规划与管理的有力工具^[4]。

2 系统评估

考虑到典型小流域的封闭性、代表性和监测结果的准确性,选取位于官厅水库流域北部的崇礼县小流域来进行系统的评估和应用研究。该流域出口位于崇礼县下游清水河上的张家口市水文站,并在该水文站进行小流域的降雨过程监测。

2.1 前期数据处理

流域基础信息的存储和管理采用专题图方式,包括 1:250 000 数字高程图、1:1 000 000 标准化矢量格式的土壤类型图、土地利用图、行政区划图(县级)。

首先利用 ArcInfo Workstation 8.1 Grid 模块中的地表水文分析模型对官厅水库流域 DEM (digital elevation model) 图进行水系划分,崇礼县小流域的控制面积约 2 100 km²,采用 400m × 400m 网格单元划分小流域。

选择 2001-06-14 降雨条件下的径流和水质监测数据对模型进行参数率定,该场暴雨是 2001 年入夏的首场暴雨,降雨量 19.8mm,降雨历时 12.8h。

A GN PS 模型的水文模型所采用的 SCS (soil conservation service) 曲线数方法和土壤侵蚀模型所采用的通用土壤流失方程(USLE)都是经验方法,建立在大量实测数据基础之上,并且和土地利用及土壤类型密切相关。这两种方法在美国已普遍使用,其他国家和地区也有大量应用,国内学者对这两种方法也有一定程度的研究并进行了修正^[5,6]。作者参照国内已有研究成果,根据崇礼县小流域实际情况对 SCS 和 USLE 的参数进行了调整。按照 SCS 方法,由于是入夏的第一场暴雨,崇礼县小流域前期土壤湿度状况为 I 型,即干旱半干旱型。另外,根据文献资料对官厅水库地区 15 个重点站的降雨侵蚀力因子 R 进行重新计算拟合。在参数修正的基础上,该次降雨条件下模型的计算结果见表 1。

表 1 模型计算结果

各项指标	径流量	泥沙流失量	$m_{\text{总氮}}$	m_{COD}
	m ³	t	t	t
实测值	217 782	18.83	5.25	15.2
计算值	207 855	30.71	2.44	2.4
误差/%	-4.56	63.09	-53.52	-84.21

2.2 模型计算结果分析

Novotny 在对众多的非点源模型进行评估后指出:在可靠性方面,最准确的模型是模拟小型的均匀不透水流域的水文子模型,误差约为百分之几;降雨径流子模型的可靠性最好,可能误差最小;而土壤侵蚀和泥沙输移子模型次之;污染物迁移转化子模型最差(大尺度流域非点源水质模型的误差可达一个数量级以上)^[7]。

从模型的计算结果来看,基本符合上述趋势。模型的误差按照水文子模型、土壤侵蚀子模型、污染物迁移转化子模型的顺序传递放大。

1) 降雨径流子模型

官厅水系属于半干旱季风气候区,水文条件较差,降水季节变化大,年内集中性暴雨主要在七八月份,实际的前期降雨损失量小,因而径流量计算结果相对偏小。降雨径流过程是形成非点源污染的直接动力,是整个研究的基础。从模型计算结果来看,与实测数据吻合程度较高。

2) 土壤侵蚀和泥沙输移子模型

由于采用单场暴雨数据验证悬浮物存在着很大

的不确定性, 计算结果误差偏大。对 USLE 的参数灵敏度分析结果表明降雨侵蚀因子 R 的敏感度最强, 调整后崇礼县小流域的年 R 值赋为 100。

3) 污染物迁移转化子模型

污染物的迁移转化过程包括径流溶解和泥沙吸附携带这两部分, 所引入的误差是最显著的。同时暴雨径流期间监测到的 N、P 和 COD 还包括工业点源、城镇集中生活排水管网、农村生活污水、畜禽养殖业污水的贡献。根据非点源污染物来源解析, 畜禽养殖和农村生活污水排放的 N、P 和 COD 是非点源污染的主要来源。

2.3 模型验证

模型的验证采用崇礼县小流域 2001-07-19 降雨监测数据, 降雨量 24.5mm, 降雨历时 11.3h。

3 系统的初步应用

应用 AGNPS 模型评价非点源污染控制措施的效果是 DSS 的一个很有意义的应用, 也就是用 AGNPS 模型来评价非点源污染控制措施对控制径流、土壤侵蚀以及污染物迁移转化的有效性。

评价方法的思路是: 流域非点源各项控制措施通过改变流域的水文与自然特征以及采取农艺措施的时间和类型, 来影响非点源污染负荷的输出。在 AGNPS 模型中, 分别存在表征流域水文与自然特征和描述农艺措施参数, 通过调整这些参数值可反映非点源控制措施的作用。将采取不同非点源污染控制措施的模型输出结果, 与相应本底条件的模型输出结果相比较, 可以评估各项非点源污染措施的效果。各种控制措施对模型输入参数的调整通过文献调研及不同类型源实验数据得到^[8], 见表 2。

表 2 非点源污染控制措施对模型输入参数的影响

编号	措施名称	土地利用	水文条件	坡度 (°)	施肥量/(kg·hm ⁻²)	
					N	P
1	坡地改梯田	林地	好	15	0	0
2	退耕还林	耕地	好	10	—	—
3	等高种植	耕地	好	—	—	—
4	秸秆覆盖	耕地	好	—	—	—
5	缓释氮肥	耕地	—	—	—	—
6	平衡施肥	耕地	—	—	100	30
7	叶面施肥	园地	—	—	100	30
8	隔离草带	草地	好	10	0	0

注: “—”表明措施的实施对该项参数无调整。

当控制措施的数量较大时, 由各种措施所得到的组合数将迅速增大, 人工判别各种组合的优劣将因工作量激增而变得不现实。为此, 需要建立针对大量措施组合的自动筛选模型。模型筛选的作用是给

出符合一定要求的控制方案集, 即由模型使用者指定一些指标的阈值, 如对污染物的削减率、投资等, 模型计算各个方案的相应指标数值, 并得出符合使用者要求的方案集合。计算的结果直接提供各个方案的基础信息, 供决策者参考。

为了研究不同措施组合的非点源控制效果, 在崇礼县小流域用 AGNPS 模型作 1a 时间的模拟, 降雨量数据采用洋河宣化气象站的 1999 年的监测数据。AGNPS5.0 模型是建立在单次降雨事件过程中, 因此进行 1a 时间序列的模拟需要保证各单次降雨之间的独立性。对 CN 值作参数灵敏度分析的结果指出, 在崇礼县小流域 10mm 以下的单次降雨事件中不产生径流。1999 年为偏枯水年, 全年可用于计算的降雨有 7 场, 占总雨量的 60%, 7 场降雨在时间分布上的离散程度较好。因此, 分别把 7 场降雨量数据带入 AGNPS 模型, 将输出累加即得到全年的非点源污染物总量。

根据 1999 年水质现状评价, 崇礼县小流域出口断面为 V 类水体, 氨氮为主要控制因子。以该断面达到 IV 类水质为控制目标进行筛选, 结果见表 3。图 2~5 分别为本底条件和采用方案 1 控制条件下的悬浮物和氨氮输出分布示意图。

表 3 控制措施组合筛选结果

方案编号	控制措施组合	径流量 亿 m ³	$m_{\text{氨氮}}$ t	$\rho_{\text{氨氮}}$ mg·L ⁻¹	削减率 %
0	本底条件	0.1104	18.32	1.66	—
1	1, 2, 4, 6, 7	0.1056	8.24	0.78	55.02
2	1, 2, 4, 6, 8	0.1060	8.59	0.81	53.11
3	1, 2, 4, 6	0.1049	8.60	0.82	53.06
4	1, 2, 6, 8	0.1051	9.67	0.92	47.22
5	1, 2, 6	0.1053	9.69	0.92	47.11

由筛选结果可知, 退耕、坡地改梯田和平衡施肥对于控制土壤侵蚀和污染物输出的效果较好, 在该地区宜推广使用。

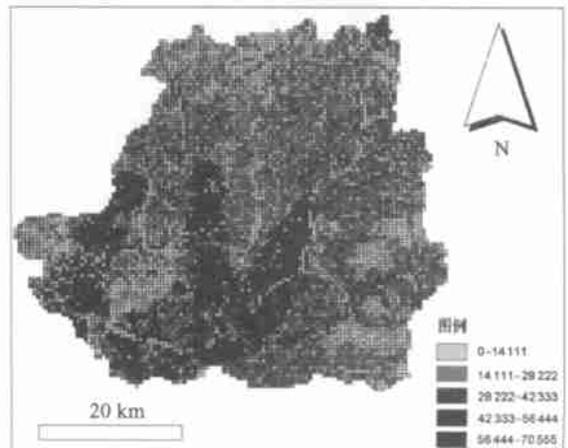


图 2 本底条件下悬浮物输出分布(kg·hm⁻²)

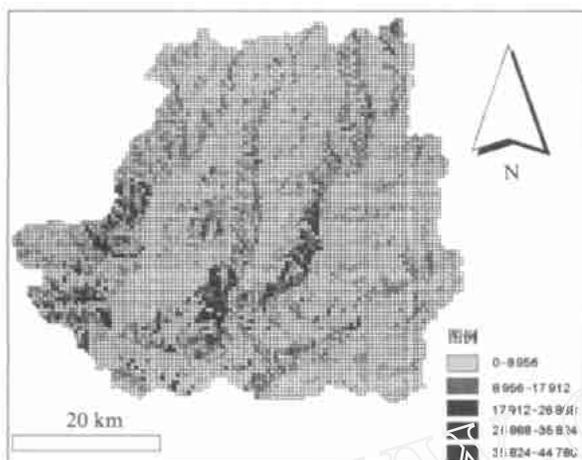


图3 方案1控制条件下悬浮物输出分布

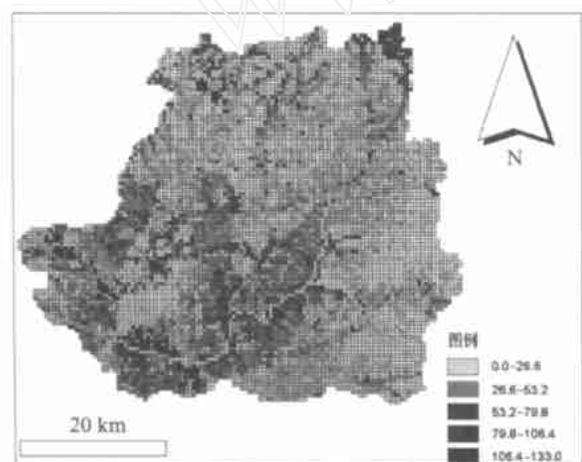


图4 本底条件下氮磷输出分布($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

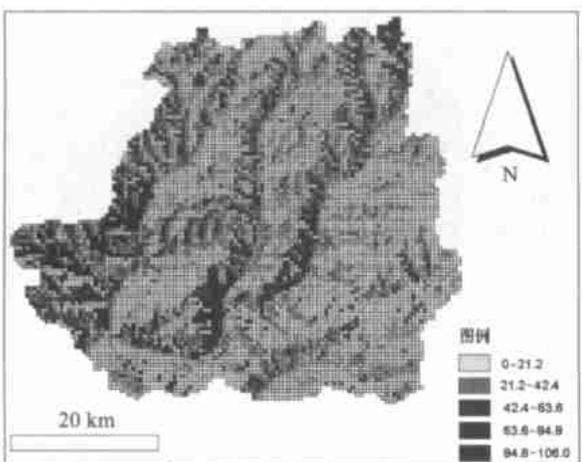


图5 方案1控制条件下氮磷输出分布($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

4 结论

1) 本文主要展示了将农业非点源模型A GN PS与GIS技术结合以改进模型的数据输入、模型模拟和输出结果分析等工作。研究表明: 这种整合方式增强了模型在流域尺度上的模拟和预测能力, 能为非点源污染控制管理提供有力的决策支持。

2) 非点源污染控制措施种类多、数量大, 由各种措施相互组合形成的控制方案的数目庞大。建立筛选模块, 由计算机化手段产生出各种措施的组合方案, 极大地提高了方案生成的效率, 在避免不合理的方案出现的前提下囊括了所有可能的方案。

3) 由于A GN PS模型的水文子模型和土壤侵蚀是经验性模型, 在数据稀缺的地区, 它比数学物理模型适应性更强, 对A GN PS型模型在大尺度流域的应用, 只要有足够的监测数据对模型参数进行率定和验证, 它的计算结果可以满足规划和管理层次上的需要。

参考文献 (References)

- [1] 高淑琴, 侯克. 石家庄: 官厅流域上游非点源污染调查报告[R]. 9550610400-04-01, 河北省水利科学研究院, 2001.
GAO Shuqin, HOU Ke. Shijiazhuang: The Report of Non-Point Source Pollution Inquiry in Upper Reaches of Guanting Watershed [R]. 9550610400-04-01, Hebei Province Water Conservancy Science Institute, 2001. (in Chinese)
- [2] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. Agricultural Non-Point Source Pollution Model: A Watershed Analysis Tool [M]. Morris: Agriculture Research Service, U. S. Department of Agriculture, 1986
- [3] Pullar D, Springer D. Towards integrating GIS and catchment models [J]. *Envir Modelling & Software*, 2000, (15): 451 ~ 459.
- [4] Leon L F, Lam D C, Swayne D A, et al. Integration of a non-point source pollution model with a decision support system [J]. *Envir Modelling & Software*, 2000, (15): 249 ~ 255.
- [5] 王万中, 焦菊英, 郝小品, 等. 中国降雨侵蚀力R值的计算与分布 I [J]. 水土保持学报, 1995, 9(4): 5 ~ 18.
WANG Wanzhong, JIAO Juying, HAO Xiaopin, et al. Study on rainfall erosivity in China I [J]. *J of Soil and Water Conservation*, 1995, 9(4): 5 ~ 18. (in Chinese)
- [6] 王万中, 焦菊英, 郝小品, 等. 中国降雨侵蚀力R值的计算与分布 II [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 29 ~ 39.
WANG Wanzhong, JIAO Juying, HAO Xiaopin, et al. Study on rainfall erosivity in China II [J]. *J of Soil Erosion and Soil Conservation*, 1996, 2(1): 29 ~ 39. (in Chinese)
- [7] 沈晋, 沈冰, 李怀恩, 等. 环境水文学 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1992.
SHEN Jin, SHEN Bing, LI Huaen, et al. Environmental Hydrology [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1992. (in Chinese)
- [8] 赵刚. 非点源污染控制筛选研究 [D]. 北京: 清华大学, 2001.
ZHAO Gang. Research on the Screening of Non-Point Source Pollution Control Measures [D]. Beijing: Tsinghua Univ, 2001. (in Chinese)