

AGNPS 模型及其应用

张玉斌^{1,2}, 郑粉莉^{1,2}

(1. 中科院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100;
2. 西北农林科技大学, 陕西 杨陵 712100)

摘 要: AGNPS 模型是美国研发的用于模拟小流域土壤侵蚀、养分流失和预测评价农业非点源污染状况的计算机模型。介绍了 AGNPS 模型的结构、输入输出变量、适用范围, 概述了 AGNPS 模型在美国、欧洲、澳洲和我国南方地区的应用结果。

关键词: AGNPS 模型; 模型结构; 应用

中图分类号: S 157. 1; X 53 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2004) 04-0124-04

AGNPS Model and Its Application

ZHANG Yu-bin^{1,2}, ZHENG Fen-li^{1,2}

(1. *The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China;*
3. *Northwest Sci-tech University of Agriculture & Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: AGNPS (Agricultural Non-point Source) model is a computer model for predicting soil loss and nutrient loading, and evaluating agricultural non-point source pollution at small watershed scale. AGNPS structure, input and output variable parameters, its application scope are described. It is also evaluated simulated results of application of AGNPS to the United Sates, and overseas as well as the South China. The simulated results indicated that AGNPS model could be suitable to use in different regions of the world and the South China.

Key words: AGNPS model; structure; application

由美国农业部研发的 AGNPS (Agricultural Non-point Source) 模型^[1] 是广泛用于农业非点源模拟的计算机模型。该模型较易在 IBM 兼容 PC 机上运行。确定临界区域后, 通过改变参数评价不同管理措施的效果, 选择最有效可行的方案, 从而达到有效控制农业非点源的目的。

1 模型概述

AGNPS 模型是由美国农业部农业研究局与明尼苏达污染防治局共同研制出的计算机模拟模型^[1, 2-19], 是一个基于方格框架组成的流域分布式事件模型, 按照栅格采集模型参数, 由水文、侵蚀、沉积和化学传输四大模块组成, 用以 N、P 元素等土壤养分流失预测, 并对农业地区的水质问题以重要性为顺序进行排列, 同时对次暴雨径流和侵蚀产沙过程进行模拟。流域的尺度大小从几 hm² 到大约 20 000 hm², 流域被以 0. 4 hm² 到 26 hm² 的单元进行均等分室, 流域内径流、污染物、泥沙沿各分室汇集于出水口(见图 1)。

在次降雨过程中, 对每一分室的径流特征和泥沙、养分以及 COD(化学需氧量) 的迁移过程进行描述、模拟和评价, 同时某一分室的输出将成为相邻分室的输入。AGNPS 模型中的

侵蚀模块以 U SLE 为基础应用于次暴雨过程, 在次暴雨事件中以 EI 指数进行表达, 土壤侵蚀函数包括侵蚀与沉积; 模型中的水文模块是以美国 SCS 曲线法为基础的, 用以预测径流量和径流高峰; N、P 元素在流域的迁移传输通过化学传输模块, 分为可溶性部分和泥沙结合态进行计算。

AGNPS 在应用中虽然取得较好的效果, 但由于它是单事件模型, 在应用中有许多局限性, 因此 20 世纪 90 年代初, 美国农业部自然资源保护局与农业研究局转向开发连续模拟模型 - AnnAGNPS 模型 (Annualized AGNPS)^[3]。AnnAGNPS 模型是一种连续模拟模型, 它不是沿袭 AGNPS 模型均等划分分室的方法, 而是按流域水文特征将流域划分为一定的分室, 即按集水区来划分单元, 使模型更符合实际(见图 1); 并以日为基础连续模拟一个时段内各分室每天及累计的径流、泥沙、养分、农药等的输出结果, 可用于评价流域内非点源污染的长期作用效果。AnnAGNPS 模型的另一改进是采用修正的通用土壤流失方程(RUSLE) 预测各分室的土壤侵蚀。此外 AnnAGNPS 模型还包括一些特殊的模型计算点源、畜牧养殖场产生的污染物、土坝、水库和集水坑对径流、泥沙的影响。

① 收稿日期: 2004-07-10
基金项目: 农业部 948 项目(2003- Z57)
作者简介: 张玉斌(1977-), 男, 山东莒南人, 在读博士生, 研究方向为土壤侵蚀与环境效应评价。

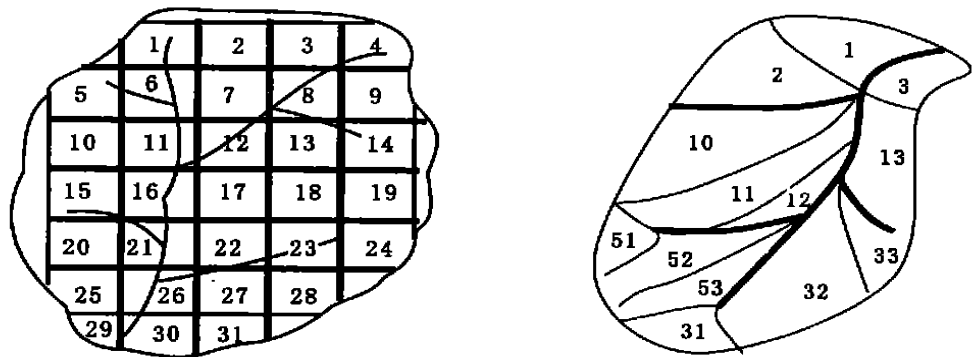


图 1 计算机模拟图形

AnnAGNPS 模型主要由数据输入和编辑模块、年污染物负荷计算模块、数据输出和显示模块 3 部分组成。在模型应用中,最主要的是数据准备,数据准备模型由 4 部分组成: 流网生成模块(Flownet Generator)、数据录入模块(Input Editor)、气象因子生成模块(Generation of weather elements for multiple application)和数据文件转换模块(AGNPS - to - AnnAGNPS Converter)。

2 模型结构

AGNPS 是面向事件的分布式参数模型,模型包括水文、侵蚀和化学物质迁移三个部分,其中营养物质考虑引起水体污染的主要因子氮和磷。模型对化肥的施用、降雨和径流以及渗透进行了模拟,且其模拟范围已扩大到土壤和地下水氮平衡的连续模拟。

模型以网格为基本运行单位,通过网格间逐步演算的方法推算至流域出口。对于面积超过 800 hm² 的流域,建议使用 16 hm² 的网格尺寸。一般,网格划分越细,计算精度越高,但模型运行所需的时间越长,精力消耗也越大。实际应用时应根据具体情况而定。

2.1 水文部分

采用美国 SCS (Soil Conservation Service Curve Number) 曲线法,计算地表径流量、峰值流量及网格单元的径流分配。

其中,径流量

$$Q_d = (P - I_a)^2 / (P - I_a + S)$$

式中: P ——降雨量(mm); S ——流域饱和储水量(mm),由 CN(Curve Number)确定, $S = (1\,000 / CN) - 10$; I_a ——初损(mm),一般取 0.2 S 。即:

$$Q_d = (P - I_a)^2 / (P + 0.8S)$$

峰值流量用 Smith 和 William 得出的经验相关方程推算:

$$Q_p = 3.79A^{0.7}C_s^{0.16}(R_o/25.4)^{0.0931}LW^{-0.19}$$

式中: Q_p ——洪峰流量, m³/s; A ——流域面积, km²; C_s ——渠道底坡比降, m/km; R_o ——径流量, mm; LW ——流域长宽比,等于 L^2/A ; L ——流域长度, km。

2.2 侵蚀部分

当沉积物负荷小于搬运能力时便发生分离现象,反之发生沉积现象。由于不同粒径的颗粒携带和输运污染物的能力相差很大,模型将固体颗粒分 5 个粒径等级进行计算。颗粒粒径越小,其比表面积越大,泥沙颗粒的比表面积约为 4 m²/g,而黏土颗粒的比表面积依据不同的黏土类型约为 20 ~ 800 m²/g。因此,沉积物中黏土成分的微小变化就能导致其搬运能力的大幅改变。

模型给出了每个单元分离点沉积物颗粒级别的分布,以

及每一级别的成分,泥沙分为黏土、粉粒、小团粒、大团粒和砂石等 5 个颗粒级别。

模型采用修正的通用土壤流失方程(RUSLE)计算流失量,即:

$$SL = EI \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \cdot SSF$$

式中: SL ——土壤流失量; EI ——降雨能量因子,由降雨动能和最大 30 min 雨强求得; K ——土壤可蚀性因子; LS ——坡度坡长因子; C ——植被覆盖因子; P ——侵蚀控制措施因子; SSF ——坡型调整因子。

计算完径流和土壤侵蚀后,对其携带的泥沙逐个按单元依次演算,直至流域出口,其间有复杂的迁移和沉积关系,由稳态连续方程推导基本演算方程为:

$$Q_s(x) = Q_s(0) + Q_{sl}(x/L_r) - \int_0^x D(x) w dx$$

式中: $Q_s(x)$ ——河(渠)段下游泥沙输出量; $Q_s(0)$ ——河(渠)段上游泥沙输入量; x ——泥沙汇入点到河(渠)段下游的距离; w ——河(渠)道宽; Q_{sl} ——旁侧泥沙汇入量; L_r ——河(渠)段长度; $D(x)$ ——沉积率,用下式估算:

$$D(x) = [V_{ss}/q(x)] \cdot [q_s(x) - g'_s(x)]$$

式中: V_{ss} ——颗粒沉积速率; $q(x)$ ——单宽径流量; $q_s(x)$ ——单宽泥沙负荷; $g'_s(x)$ ——单宽有效输沙能力。

用修正的 Bagnold 河流能力方程,计算有效输沙能力:

$$g'_s = \eta g_s = \eta_k \frac{\tau v^2}{V_{ss}}$$

式中: η ——有效输沙因子; g_s ——输沙能力; k ——输沙能力因子; τ ——黏性摩擦阻力; v ——河(渠)道平均流速,由曼宁公式推求。

用下式计算每个单元流出的 5 个颗粒级别的泥沙负荷(该式为泥沙输移模型的基本方程):

$$Q_{s_i}(x) = \left[\frac{2q(x)}{2q(x) + \Delta x V_{ss}} \right] \cdot \{Q_{s_i}(0) + Q_{sl_i} \frac{x}{L} - \frac{w \Delta x}{2} \cdot \left[\frac{V_{ss}}{q(0)} [q_{s_i}(0) - g'_{s_i}(0)] - \frac{V_{ss}}{q(x)} g'_{s_i}(x) \right] \}$$

2.3 化学物质的迁移

采用 CREAM 模式和饲养场评价模型对模型的化学物质迁移部分的 N、P、COD 的迁移进行计算。化学物质的迁移传输通过化学传输模块,分为可溶性部分和泥沙结合态进行计算。

泥沙结合态的营养物吸附量采用单元的总泥沙量计算:

$$Nut_{sed} = (Nut_f) \cdot Q_s(x) \cdot E_R$$

式中: Nut_{sed} ——沉积物输运的 N 或 P 的浓度; Nut_f ——土壤中 N 或 P 的含量; E_R ——富集比, $E_R = 7.4Q_s(x)^{-0.2}T_f$,其中 $Q_s(x)$ 为泥沙量, T_f ——土壤质地的校正系数。

可溶性营养物质的估算考虑了降雨、施肥和淋溶对营养物质的影响。径流中可溶性营养物质由下式估算:

$$Nut_{sol} = C_{nut} Nut_{ext} Q$$

式中, $N_{ut_{sol}}$ ——径流中可溶性 N 或 P 的浓度; C_{nit} ——降雨过程中土壤表层 N 或 P 的平均浓度; $N_{ut_{ext}}$ ——N 或 P 进入径流的提取系数; Q ——径流量。

COD 被认为是可溶的, 根据径流量和径流中 COD 平均浓度估算。通过调查获得的 COD 背景值可作为预测每个单元 COD 浓度的基础, 并认为迁移演算和累计过程中没有损失。

3 所需输入资料及模型输出

3.1 模型输入参数

模型输入参数包括流域总体特征值和单元级参数。流域总体特征值有流域面积 A、流域长度 L、单元面积、单元总数、降雨量 Pw、降雨能量—强度值 EI。单元级参数在单元内都是相等的, 列示如下: 单元编号 CN; 汇水进入的单元编号 RC; 径流曲线数值 CN; 单元平均坡度 LS(%); 单元平均坡长 SL; 单元坡向 A(共分 8 个方向); 坡型因子 SSF(直形坡、凸坡、凹坡); 河(渠) 道指示 CI(单元内是否有河(渠) 道); 河(渠) 道底坡比降 CS(m/ km); 河(渠) 道边坡坡度 CSS(%); 河(渠) 道曼宁系数 n; USLE 土壤侵蚀因子 K; USLE 植被覆盖因子 C; USLE 侵蚀控制因子 P; 地面条件常数 SCC(和土地利用有关的因子); 土壤质地 T(砂石、粉砂、黏土、泥炭); 化肥施用水平 F(无、低、中、高); 化肥比例因子 AF(土壤表面 1 cm 残留的化肥比例百分数); COD 平均浓度或背景值; 滞水因子 IF(单元内有梯田或其它储水系统); 点污染源标志 PS; 沟蚀水平 GS(分室内冲沟侵蚀程度)。

3.2 初步输出结果

研究流域的初步输出结果包括流域面积和网格尺寸、降雨和可蚀性(EI)、流域出口径流量和洪峰流量、面积加权的坡面和渠道侵蚀; 沉积物传输率、沉积物富集比、沉积物平均浓度、五种粒径颗粒的总产沙量; 单位面积可溶性和颗粒携带 N、P 及 COD 的质量、径流中 N、P、COD 的浓度。

4 适用范围

模型主要用于流域面积从几公顷到大约 20 000 hm² 的农业流域的非点源污染分析。在流域景观特征、水文过程和土地利用规划等研究领域均具有良好的适应性, 但不适合用于流域物理过程的长期演变特性, 以及土壤侵蚀的时空分布规律等方面的研究。其研究重点是河流水质, 主要研究对象是多级固体颗粒及附着的 N、P 营养元素。

5 模型应用概况

5.1 AGNPS 模型在国外的应用

在国外 AGNPS 模型已广泛用于最佳管理措施(BMPs)效果比较, 但在实际操作当中也出现了各种有待解决的问题, 如计算网格的适当选取及设计方法, 复杂繁多的输入数据整理和输出结果的表示, 模型计算结果给决策带来的风险性等。

5.1.1 计算网格的设计

由于 AGNPS 模型是一种空间分布式模型, 若其计算网格的布置不合理会直接影响到空间分布方法能代表流域(或田块) 的优点, 而目前对于网格布置的设计缺乏指导方法。Brannanh 和 Hamlett^[4] 针对这种状况, 研究开发了一套应用地质统计方法设计网格布置的步骤。其基本思想是使用地质统计分析工具选择基本网格尺寸, 并确定需进行次分的网格以用于模型。其中基本尺寸利用 SCS 曲线数目的总体空间相关结构选择。该方法能够使再次划分的网格落在流域最具相异性的区域内, 并提供了不同网格尺寸所带误差的最初信

息, 此信息即被用于设计精确网格布置, 从而保留原始数据的空间相异性。Vieux 和 Needham^[5] 对 AGNPS 的输入参数进行敏感性分析, 考察了网格尺寸对输出结果的影响。在研究区域, 采用了 5 种(1 hm², 2 hm², 4 hm², 8 hm², 12 hm²) 尺寸大小, 当网格尺寸最大时, 由于弯流的缩短使水流路径最短。而通过输沙量对各参数的敏感性分析表明, 输沙量的计算结果很大程度上取决于水流路径, 因此, 网格尺寸很大程度上会改变非点源控制措施的决策。

5.1.2 输入数据整理及输出结果的表示

模型输入数据量庞大, 须借助其它工具进行整理和准备。目前应用最多的是 GIS 技术。模型与 GIS 的集成方式有四种: 将 GIS 嵌入到模型中, 将模型嵌入到 GIS 中, 松散的耦合和紧密耦合。近来对模型与 GIS 的集成研究很多。Vieux 和 Needham 提出了基于矢量的 ARC/INFO 用于 AGNPS 模型的数据输入和输出显示^[6], 他们后又用这种耦合方式研究了不同格栅大小对模拟结果的影响^[5]。Tim 等^[7] 建立了 GIS 与 AGNPS 模型的两个界面, 用于模型输入数据的转换和输出数据的显示。He 等^[8] 开发了一个 Windows GIS- AGNPS 交互式用户界面 AVNPSM。AGNPS 模型的数据前处理、模拟过程以及后处理过程都与 GIS 耦合, 包括参数产生器、输入文件传输器、模型执行器等 7 个模块, 用户可通过下拉菜单实现各模块功能。

5.1.3 模型的风险性

模型的风险性主要来自自然条件的不确定性、模拟过程的不确定性以及模型参数的不确定性^[9]。文献^[10] 运用 Monte Carlo 模拟方法对非点源模型中水系特性和降雨随机性引起的不确定性进行了研究分析, 给出了计算结果相似性比较方法, 还发现模型网格的划分对模拟结果的精度有很大的影响。Parson 等^[9] 通过输入输出数据的概率分布分析, 表明溶解态污染物的输出结果较颗粒携带污染物的输出结果可靠。决策者使用 AGNPS 来确定 BMPs 的效果时, 应充分考虑模拟结果可能带来的风险。

5.1.4 其它

Naden^[11] 和 Rode^[12] 证实了在降雨强度较小时, Bagnold 方程会过高估算沉积物的迁移量。实际上每年总沉积物的数量主要是由一、二次特大洪水贡献而来^[13]。

Perrone 和 Madramootoo^[14] 在加拿大魁北克省的一个小流域试验了 AGNPS 模型, 以评价此模型在该省水文状况下的适用性和作用效果。该试验对 12 次暴雨径流产生的泥沙量进行了模拟。为了取得更好的模拟结果、调整了 SCS 曲线数和 LISLE 因子。前一项降雨指标被用作土壤湿度指标。AGNPS 暴雨类型和河道冲刷参数为最大的相关事件作了调整。

5.2 AGNPS 模型在中国的应用

陈国湖^[15] 认为农业非点源污染模型 AGNPS 把流域划分为正方形网格单元, 对各单元独立计算其降雨径流和土壤流失量, 用连续方程进行迁移演算, 在流域出口累计总土壤流失量及其携带的污染物质。模型简单实用, 对资料要求不高。遥感技术为模型提供了新的数据源, 地理信息系统(GIS) 具有强大的空间数据处理分析能力, 并提出了用遥感技术和 GIS 为模型输入基本参数的方法。

陈欣和郭新波^[16] 为了评价该模型在我国南方丘陵区小流域应用的可行性, 利用排溪冲小流域地形、植被、土壤等相关资料对 AGNPS 模型的磷素流失预测结果与小流域土壤磷素流失的实际周年观测资料进行了对比分析。研究结果表明, 预测结果与实际观测结果基本相符, 相关程度较高; 认为

该模型可用于南方丘陵区小流域磷素流失的预测与评价。

赵刚等^[17]认为非点源污染负荷计算模型,可为污染控制提供有效的决策支持。将 AGNPS 模型与 GIS 技术相结合,在建立云南省捞鱼河小流域试验区基础信息数据库的基础上,根据现场观测数据,对模型进行了标定,并模拟评价了几种常用的侵蚀控制措施的效果。结果表明,AGNPS 模型可以用于试验区。模型模拟的结果与已有经验和试验区的实际情况符合较好,可以为制定流域侵蚀控制规划提供有价值的参考。

曹文志等^[18]将 AGNPS 模型应用到我国的东南亚热带地区,结果显示该模型在这些地区的农业非点源负荷估算及评价中的应用潜力,说明 AGNPS 在我国实施农业非点源控制措施中的应用并不是不可行的;同时指出在研究我国大尺度农业非点源中结合 3S 技术及实地调查将是未来的发展趋势。

王飞儿等^[3]应用 AnnAGNPS 模型对千岛湖流域农业非点源污染物输出总量及时空分布进行了预测分析。研究结果表明预测结果与实测结果在一定误差范围内基本一致,验证了该模型在该流域的适用性,表明 AnnAGNPS 模型在农业非点源污染物负荷估算及评价中的应用潜力。同时,由于该研究中许多参数采用默认值,对模型的精度有一定的影响,因此未来该模型的研究应用中可结合遥感技术和进一步的实地调查,对参数进行进一步的修正,使该模型能更好地反参考文献:

[1] Young R A, Onstad C A, Bosch D D. et al. AGNPS: A nonpoint- source pollution model for evaluating agricultural watershed [J]. J. Soil and Water Cons, 1989, 44(2): 168- 173.

[2] Yu Sujun. Generation of the Data Required by AGNPS[J]. J. Southwest Jiaotong University, 2003, 11(1): 53- 57.

[3] 王飞儿, 吕唤春, 陈英旭, 等. 基于 AnnAGNPS 模型的千岛湖流域氮、磷输出总量预测 [J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 281- 284.

[4] Brannan B, Hamlett J M. Using geostatistics to select grid-cell layouts for the AGNPS model [J]. Trans. ASAE, 1998, 41(4): 1011- 1018.

[5] Baxter E Vieux, Needham Scott. Nonpoint pollution model sensitivity to grid- cell size[J]. Water Resource Plann. Manage, 1993, 119(2): 141- 157.

[6] Eng B A, Srinivasan R, Arnold J, et al. Nonpoint source pollution modeling using models integrated with Geographic Information System (GIS) [J]. Wat. Sci. Tech, 1993, 28(3- 5): 685- 590.

[7] U doyara S Tim, Jolly Robert, Liao Hsiu- hua. Impact of landscape feature and feature placement on agricultural non- ponint source pollution control [J]. J. Water Resour. Plann. Manage, 1995, 121(6): 463- 470.

[8] He Chansheng, Shi Changan, Yang Changchun, et al. A windows-based GIS AGNPS intergace [J]. Am. Water Res. Assoc. 2001, 37(2): 395- 406.

[9] Parson S C, Hamlett J M, Robillard P D, et al. Determining the decision making risk from AGNPS simulation [J]. Trans. ASAE. 1998, 41(6): 1679- 1688.

[10] Kao Jehng- jung, Hong Hong- Jyh. NPS model parameter uncertainty analysis for an off-stream reservoir[J]. Water Resources Bulletin, 1996, 32(5): 1067- 1079.

[11] Naden P S. Models of sediment transport in natural stream[A]. In: Anderson M G(ed.). Modeling Geomorphologic Systems[C]. New York: John Wiley & Sons Ltd. 1998: 217- 258.

[12] Rode M, Frede H G. Testing AGNPS for soil erosion and water quality modeling in agricultural catchment in Hesse (Germany) [J]. Phy. Chem. Earth (B), 1999, 24(4): 297- 301.

[13] Novotny V, Chesters G. Delivery of sediment and pollutants from nonpo- int sources: A water quality perspective [J]. J. Soil and Water Cons, 1989, 44: 481- 487.

[14] Perrone J, Madramootoo C A. 利用 AGNPS 预测泥沙量[J]. 水土保持科技情报, 1999, (4): 42- 44, 52.

[15] 陈国湖. 农业非点源污染模型 AGNPS 及 GIS 的应用[J]. 人民长江, 1998, 29(4): 20- 22.

[16] 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.

[17] 赵刚, 张天柱, 陈吉宁. 用 AGNPS 模型对农田侵蚀控制方案的模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(5): 705- 707.

[18] 曹文志, 洪华生, 张玉珍, 等. AGNPS 在我国东南亚热带地区的检验[J]. 环境科学学报, 2002, 22(4): 537- 540.

[19] <http://www.sedlab.olemiss.edu/agnps.html> [EB/ OL]. 2001- 02- 02.

映流域的特征,提高模拟精度。

6 模型评价

综上可以看出,AGNPS 模型是一个比较适于评价和预测小流域农业非点源污染发生的计算机模型。非点源污染具有流域空间分布特性,为模拟其产生的迁移,模型需考虑这些空间分布因素影响。AGNPS 模型综合考虑了流域的水文气象、地形、土壤类型和植被覆盖等因素,经实例验证,对计算大中型流域的非点源污染有较好的效果;同时 AGNPS 模型可以应用于试验小区,模型计算结果与实测数据吻合较好。将 GIS 技术与 AGNPS 模型相结合,可以极大地提高模型数据获取与管理的效率,方便了模型的使用。目前 GIS 在非点源污染控制中得到越来越多的应用,而且随着非点源污染研究的不断深入和 GIS 技术的发展,其应用水平将会不断提高。

AGNPS 模型在中国的应用目前还只限于南方地区,这与我国南方地区人口密集,农业生产集约化程度高,由此引起的湖泊富营养化程度严重等特点有关。但在我国北方地区,特别是黄土高原地区,为满足日益增长的人口对农产品的需求,人们大量开发坡地、过量施用化肥、农药等化学物质,在提高农作物产量的同时,也必然给环境带来严重的、潜在的危害。因此,开展 AGNPS 模型在我国北方地区应用的研究是目前农业非点源污染研究领域急需开展的工作之一。