

AnnAGNPS 模型研究及应用进展

李家科¹, 李怀恩¹, 李亚娇²

(1 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;

2 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

【摘要】 【目的】 AnnAGNPS(Annualized Agricultural Non-Point Source Pollution Model)模型是由美国农业部开发的用于模拟评估流域地表径流、泥沙侵蚀和氮磷营养盐流失的连续型分布式参数模型。文章对 AnnAGNPS 的国内外研究应用进行了全面综述, 以期对模型在我国的深入研究和应用提供参考。【方法】从 AnnAGNPS 模型的机理、结构、国内外应用现状及我国应用中存在的问题等方面作了综合性总结。【结果】模型应用情况表明, 模型对径流和非点源污染的模拟基本在可接受精度范围内, 对于地表径流的模拟能力要强于泥沙和氮磷营养盐, 对总磷输出的模拟表现出了较大的不确定性; 年、月时间尺度模拟精度高于单场降雨的模拟精度; 单场降雨雨量越大, 模拟效果越好; 大尺度区域模拟精度低于小尺度区域; 对洪峰流量估计过高。【结论】我国目前对模型的适应性和重要参数的敏感性分析方面研究较多, 受相关数据获取困难等因素的影响, AnnAGNPS 模型的应用缺乏系统性和连续性。对模型的修正或改进, 以及非点源管理措施效果的模拟评价等方面的研究有待加强。

【关键词】 AnnAGNPS 模型; 非点源污染; 研究与应用

【中图分类号】 X143

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2009)02-0225-10

Development of study on AnnAGNPS model and its application

LI Jia-ke¹, LI Huai-en¹, LI Ya-jiao²

(1 Key Lab of Northwest Water Resource and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2 School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: 【Objective】 AnnAGNPS, a continuous and distributed model developed by USDA, can simulate and evaluate the yield quantities of runoff, sediment, and nutrients of a watershed on a daily, monthly, or yearly basis according to user's specification. In this paper, study and application on AnnAGNPS model at home and abroad were analyzed in detail to offer reference for applying the model in our country. 【Method】 The principle, structure, present situation of appliance at home and abroad as well as problems of using the AnnAGNPS model in our country were presented. 【Result】 Application of the model showed that: Simulation results on runoff and non-point source pollution(NSP) of the model were accepted, of which, the simulation precision on runoff was higher than that on sediment, nitrogen and phosphorous nutrients. Simulation on total phosphorous took on some uncertainty. The simulation precision on year or month was higher than that on single rainfall. The amount of precipitation of single rainfall was bigger and the simulation effect better. The simulation precision on large-scale region was lower than that on small-scale one. The estimation on peak discharge of the model was too high. 【Conclusion】 There have been a number of studies on the adaptability of the model and sensitivity of important parameters in our country, but affected by the difficulty to acquire relevant data, the application of AnnAGNPS model lacks of systemic and continuity. Modification or improvement on the model and effects simulation as well as evaluation of non-point

* [收稿日期] 2008-04-03

[基金项目] 国家自然科学基金项目(90610030); 陕西省教育厅科学研究计划项目(06JK222)

[作者简介] 李家科(1975—), 男, 湖北荆门人, 讲师, 在职博士, 主要从事非点源污染与水资源保护研究。

source management measures need to be put into more studies.

Key words: AnnAGNPS model; non-point source pollution; study and application

随着点源污染的有效控制,非点源污染已成为水体污染的主要因素之一,因而受到越来越多的关注和研究^[1-2]。研究表明,非点源污染负荷有逐渐超过点源污染负荷,成为地表和地下水首要污染源的趋势^[3-4]。非点源污染模型是实现非点源污染定量评价的有效工具之一,其通过对整个流域系统及其内部复杂污染过程的定量描述,分析非点源污染产生的时间和空间分布特征,识别其主要来源和迁移途径,预报污染负荷量及其对水体的影响,并评价土地利用变换以及不同管理措施对非点源污染和水质的影响,为流域规划和管理提供决策支持^[5]。20 世纪 70 年代以来,随着人们对非点源污染的重视,产生了很多优秀的非点源模型^[1],AnnAGNPS(Annualized Agricultural Non-Point Source Pollution Model)就是其中之一。AnnAGNPS 是在 AGNPS^[6](Agricultural Non-Point Source)的基础上开发出来的。与其前期版本 AGNPS 相比,AnnAGNPS 模型^[7]的改进之处在于:以日为基础,连续模拟一个时段内每天及累计的径流、泥沙、养分、农药等输出结果,可用于评价流域内非点源污染的长期影响,而 AGNPS 是单次降雨模拟模型;根据地形水文特征而非均等进行流域集水单元的划分,且模拟的流域尺度更大;与 GIS 的紧密集成,使模型参数大多可自动提取,模拟结果的显示度得以显著提高。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。模拟的流域面积最大可达 3 000 km²,输入参数包括 8 大类 31 小类,约 500 多个参数,用来描述流域和时间变量,主要包括气象、地形、土壤、土地利用和管理等。1998 年发布了 AnnAGNPS 1.0 版(又称 AGNPS98),2001 年发布了 2.01 版(AGNPS2001),经过不断发展,目前 AnnAGNPS 最新版为 3.51,于 2005-03 发布,该版本完成了与 Arc View GIS 的紧密集成,所有的工作都可以在 Arc View 窗口下完成,大大提高了效率与可视化程度^[8]。另外,AnnAGNPS 模型及所有的帮助文档、参考资料,用学习例子都可以从美国农业部网站上免费下载(<http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?Docid=5199>)^[9]。本文在对 AnnAGNPS 研究应用进行全面综述的基础上,指出目前研究中存在的问题,以期模型在我国的深入

研究和应用提供参考。

1 AnnAGNPS 模型的机理和结构

1.1 模型的假设

由于非点源污染机理过程的复杂性,AnnAGNPS 模型作了如下的假定^[10]:(1)不考虑降水的空间变异,整个流域采用统一的降水参数,这也是模型模拟流域不宜过大的原因;(2)单元格可以是任意形状,但是内部的径流只有惟一方向;(3)单元格内的参数是均匀和统一的;(4)模型的运行步长为 1 d,假定所有计算成分(径流、泥沙、营养盐和农药)在第 2 天模拟开始前都已到达流域出口;(5)模拟期间点源的流量和营养盐浓度为常量;(6)模型只考虑地面水,忽略地下水的影响;(7)对于迁移中沉降在溪流的颗粒态营养盐和农药,模型忽略其以后的影响。

1.2 模型的机理

AnnAGNPS 模型以水文学为基础,主要考虑了流域的产汇流、基于产汇流的沉积物产生及迁移、基于产汇流和沉积物产生的养分及农药的迁移传输、污染物对受纳水体的影响等 4 个过程。降雨径流是形成非点源污染的直接动力,它是整个模型的基础。AnnAGNPS 模型径流计算采用 SCS^[11]曲线方程,考虑了灌溉、融雪、蒸发、渗漏等,并按每日的耕作状况、土壤水分和作物情况,调整曲线数,其中土壤前期水分条件(AMCI 和 AMCII)由 SWRRB 和 EPIC 模型计算,渗漏计算采用了 Brooks-Corey 方程,流量峰值计算采用了 TR-55 模型,蒸发计算模型采用了 Penman 方程计算潜在蒸发量。模型中使用修正的通用土壤侵蚀方程 RUSLE^[12]计算各分室中的片蚀和沟蚀量(sheet & rill),这些侵蚀量向沟道的输移率是由水文几何通用土壤侵蚀方程(HUSLE)^[13]计算的。由 HUSLE 模型计算的沉积物量进入沟道后的迁移,是基于沉积输移和容量关系,使用了 Bagnold 沟道指数方程^[14],分别计算基流和紊流下的泥沙量,输出结果按 3 种来源(sheet & rill、gully、and bed & bank)分 5 级输出,即粘粒(clay)、粉砂(silt)、砂粒(sand)、小团粒(small aggregates)和大团粒(large aggregates)。模型逐日计算各单元内氮、磷和有机碳的养分平衡,包括作物对氮磷的吸收、施肥和氮磷的迁移等。氮磷和有机碳的输出按可溶态和颗粒吸附态分别计算,并采用了一级动力

学方程计算平衡浓度。作物对可溶态养分的吸收计算,则采用了简单的作物生长阶段指数。采用与 CREAMS 模型相同的公式来计算碳、氮、磷 3 种营养物的颗粒吸附态和溶解态浓度。采用 GLEAMS 模型计算各种杀虫剂的质量平衡,对每种杀虫剂按独立的方程进行计算。计算主要考虑了作物洗脱以及在土壤中的垂直迁移、降解过程,结果可按可溶态和颗粒吸附态逐日输出。受纳水体水质模型主要考虑农业面源污染负荷对受纳水体的影响。AnnAGNPS 采用后续的集成模型 CCHE1D、SNTMP、ConCEPTS 等对受纳水体的农业面源污染影响进行分析。

1.3 模型的结构

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,即流网生成模块(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 AGNPS 和 AnnAGNPS 模型的研究及应用进展

2.1 AGNPS 的研究及应用进展

国外对 AGNPS 模型的研究非常深入,在模型适应性检验、参数灵敏度分析、计算网格的适当选取及设计方法、输入数据整理及输出结果表示、流域面源污染管理措施的效果评价等方面都有深入研究。

(1) 模型适应性检验。Young 等^[6]对 AGNPS 模型进行了初步验证和应用研究:将位于美国中北部的 20 个不同流域的径流量、洪峰流量观测值与模拟估计值相比较,相关系数 R^2 为 0.81;沉积物产量的估算数据来自 Treynor Iowa 附近的 2 个试验流域和 Hastings Nebraska 附近的 1 个流域,将模型的沉积物产量估算和来自 3 个流域的监测值相比,结果吻合较好;径流中的化学成分是利用 Minnesota 州 7 个不同流域 3 年的降雨径流监测数据,将 20 个不同样本的总氮和总磷监测值与模型模拟值进行拟合,结果比较吻合。Perrone 等^[15-16]在加拿大 Quebec 省的 St. Esprit 流域校准并验证了 AGNPS 模型,在模型的校准中调整了径流曲线数、植被管理因子和水文因子,估算了径流量、洪峰流量和沉积量。Grunwald 等^[17]研究了 58 个降雨径流事件,并

对模型进行了校准和有效性验证。

(2) 参数灵敏度分析。Fisher 等^[18]研究了 2 种分布式非点源模型(AGNPS 和 ANSWERS)对地貌空间的敏感性,认为 AGNPS 模型对大多数空间输入数据的敏感性较小,只有渗透参数会导致沉积和营养物较大的输出变化。

(3) 计算网格的适当选取及设计方法。Feezor 等^[19]、Panuska 等^[20]、Vinux 等^[21]、Grunwald 等^[22]使用边长显著差异网格,研究了 AGNPS 模型网格大小对水文、沉积物和营养成分输出的影响,最终认为网格大小是沉积物产量计算中最重要的影响因素。Brannan 等^[23]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。

(4) 输入数据的整理及输出结果表示。为使模型使用更方便,国外在模型建立之初就很注重参数的采集及数据处理和模型运行的自动化,并为此进行了大量研究。Olivieri 等^[24]研究了用远程传感技术采集 AGNPS 模型所需的数据。Hession 等^[25]将 AGNPS 和 GIS 集合在一起,提高了模型数据的获取与管理效率。Needhan 等^[26]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。Tim 等^[27]建立了 GIS 与 AGNPS 模型的 2 个界面,用于模型输入数据的转换和输出数据的显示。He 等^[28]开发了 1 个 Windows GIS-AGNPS 交互式用户界面 AVNPSM。Leon 等^[29]将决策支持系统与 AGNPS 模型进行了集成。

(5) 流域面源污染管理措施的效果评价。Young 等^[6]在 Garvin Brook watershed(明尼苏达州)和 Salmonson Creek watershed(South Dakota-Minnesota 州交界处)进行了 AGNPS 模型的应用,并评价了各种管理措施的影响。Koelliker 等^[30-31]在 Kansas 东北部 5 个不同流域使用独立事件的模型 AGNPS,研究沉积物和营养物的输出,利用来自航片和实地调绘的土地覆被信息资料,评价了各种土地利用情景,并将模型模拟结果与 Kansas 的小水库沉积物的研究结果进行了比较,由于缺乏监测资料,其不属于真正意义上的验证。Prato 等^[32]使用 AGNPS 研究了不同水土保持方法对减少土壤潜在侵蚀量的作用。Tim 等^[33]、Rode^[34]使用 AGNPS 模型模拟比较了土地利用和耕地措施对农业非点源污染的影响。Grunwald 等^[35]用 AGNPS 模型比较了不同水土保持管理措施的效益。Mankin 等^[36]将

AGNPS 模型在 900 km² 的 Kansas Melvern 流域进行了应用,基于航片和实地调绘得到的流域土地覆被信息,用年过程和 15 种暴雨的模型估算结果来估算 Melvern 流域各种土地利用情景的年沉积量。Bhuyan 等^[37]使用 AGNPS-ARC/INFO 界面,通过 TM 影像的土地覆被判读与分类,估算了 Kansas 州 Cheney 水库流域各子流域的地表径流和总悬浮物,并采用实测资料进行了验证,为流域土地利用决策、管理策略和最佳管理措施的制定(BMPs)提供了依据。Bhuyan 等^[38]估算了 Cheney 水库各子流域的营养物流失量,并对其进行了验证。综上所述,模型在美国 Kansas 州的应用最为完整和系统。

在我国,最早 Lo^[39]将 AGNPS 模型在台湾 Ba-jun River 流域和 Tsengwen 流域进行了应用;其后,于苏俊等^[40]开发了一种运算法,可自动生成 AGNP 模型所需要的大部分资料,把模拟结果转换成 GIS 文件格式,并在绵阳官司河流域进行了应用。曹文志等^[41]、洪华生等^[42]将 AGNPS 模型在我国东南亚热带地区进行了验证。陈欣等^[43]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,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,证明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^[44]对云南省捞鱼河小流域几种常用侵蚀控制措施的效果进行了模拟评价,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。

2.2 AnnAGNPS 模型的研究及应用进展

AnnAGNPS 模型自开发以来,在美国、澳大利亚、马来西亚、捷克、尼泊尔以及我国等许多国家和地区得到了广泛应用,应用侧重在模型的适应性检验、模型参数敏感性分析和流域管理措施效果模拟等方面。

(1)模型的适应性检验。Yuan 等^[45]预测了位于密西西比三角洲 Leflore 县的 Deep Hollow 流域 3 年(1997~1999 年)径流和沉积物产量,并将预测值和观测值进行了比较,结果表明,AnnAGNPS 足以预测长期月和年的径流及沉积物产量,但是单个事件的模拟效果较年和月的模拟效果差。其后,Yuan 等^[46]使用 AnnAGNPS2.0 预测了该流域 1997~1999 年的氮负荷,结果显示,月的氮负荷匹配较差,线性回归系数 R^2 只有 0.28,而且高估了休耕季节的氮负荷,低估了作物生长季节的氮负荷,这

是因为在 AnnAGNPS 2.0 的版本中缺乏反硝化作用的模拟(在 3.3 版中已经修正了这个问题)。Sut-tles 等^[47]在美国东南沿海平原佐治亚州中南部的 Little River 流域上游,使用该模型模拟了 7 年的氮、磷及沉积物量和径流量,并将模拟结果与 5 个亚流域出口和 Little River 流域出口 7 年的监测数据进行了比较,结果证明了在流域上游的年径流量预测是观测值的 1/3 到 1/2,相比较而言,在流域下游预测的径流量接近观测值,在流域总出口的观测径流是模拟值的 100%;因此认为流域上游径流量的低估是由于土地覆被分辨率不同所致。Baginska 等^[48]研究了悉尼西北 255 hm² 的 Currency Creek 流域,对其进行了氮磷负荷模拟,并用观测数据对模拟结果进行验证,结果表明,模型在模拟径流量和氮磷负荷中的适用性。Shrestha 等^[49]检验了 AnnAGNPS 模型对尼泊尔 Siwalik 丘陵地区面积为 130.8 hm² 的 Masrang Khola 流域的径流量、洪峰流量和泥沙量的预测能力,结果表明,模型对径流量的预测在可接受的精度范围内,洪峰流量和泥沙量估计过高,因此建议根据当地条件对拓展的 TR55 进行修正或改进,以提高洪峰流量的预测精度,同时通过改进 RUSLE 和 HUSLE 的输入参数提高了泥沙量的预测精度。Sarangi 等^[50]将 AnnAGNPS 模型用于加勒比海 St. lucia 岛 2 个不同管理方式的小流域,即一个森林流域(7.8 hm²)和一个农业流域(4.0 hm²)的径流量和泥沙流失量的预测,初步研究结果表明,模型模拟精度在可接受的范围内,能够用于径流量和泥沙流失量的估算;研究还发现,对于这 2 个流域,对降雨深度大的事件,径流量的模拟效果相当好,而对洪峰流量普遍估算过高,这主要是由于模型使用的方法源自单位水文曲线。Polyakov 等^[51]将 AnnAGNPS 模型应用于夏威夷 Kauai 岛一个 48 km² 的流域,检验了其在具有火山土壤和降雨时空高度差异特点的热带流域的适应性,并采用 2003 和 2004 年的监测数据对模型进行了率定和检验,结果表明,月径流量预测值和实测值吻合很好,但在最枯月份(5 和 7 月),实测值和模拟值相差达 60%,日径流预测精度较低;总的月泥沙预测值和实测值相差在 50%以内,日泥沙量预测值和实测值相关性很差。Shamshad 等^[52]应用 AnnAGNPS 模型对马来西亚 River Kuala Tasik 流域(6 309.25 hm²)的径流、泥沙和营养物负荷进行了模拟,评估模型在马来西亚环境条件下的适应性,并采用 2004 和 2005 年降雨径流事件资料分别进行了率定和检验,

结果表明,径流量预测很好,泥沙负荷预测精度适中,氮负荷预测较好,磷负荷预测较差。Zdeněk Kliment 等^[53]以捷克 Blšanka 河流域(374 km²)为例,比较了 AnnAGNPS 和 SWAT 模型对其悬浮泥沙的模拟能力,并采用 1995~2004 年日流量和悬浮泥沙产量进行了模型的率定和检验(其中前 5 年资料用于率定,后 5 年资料用于检验),结果显示,对于长期连续模拟,SWAT 模拟结果和实测值吻合较好,而对短期降雨径流事件的模拟,特别是短期持续密集降雨事件的模拟,用 AnnAGNPS 模拟悬浮泥沙更为精确。

在我国,AnnAGNPS 较早多被用于南方地区,特别是东南沿海地区。董亮^[54]利用 Black-land GRASS GIS 和 AnnAGNPS 模型,对西湖流域的金沙涧、龙涨涧和长桥溪子流域的非点源氮磷污染情况进行了模拟和研究,结果表明,AnnAGNPS 模型对各子流域的年径流负荷、总氮负荷和总磷负荷的估算都有较好的准确性。郭新波^[55]以浙江兰溪蒋家塘小流域为研究对象,应用 AnnAGNPS 模型预测了南方红壤小流域土壤的侵蚀情况,结果表明,模型预测各年的输出泥沙与实测泥沙显著相关(0.98, 5 年),模型预测的流域土壤侵蚀模数与实测土壤侵蚀模数以及 Rusle2 预测的土壤侵蚀模数基本一致,说明用 AnnAGNPS 模型预测南方红壤小流域土壤侵蚀是可行的。朱松等^[56]、叶枝茂等^[57]采用 AnnAGNPS 模型对浙江省宁海县颜公河流域农业非点源氮、磷污染负荷进行了模拟计算,得到该区域的可溶性氮、磷误差分别为 3.67% 和 28%,结果基本可靠。王飞儿等^[58]、吕唤春^[59]运用 AnnAGNPS 模型,对浙西和皖南地区 10 442 km² 千岛湖流域的农业非点源污染物输出总量及时空分布进行预测分析,预测结果与实测结果在一定误差范围内基本一致,说明该模型可用于农业非点源污染负荷估算及评价。洪华生等^[8]、黄金良等^[60]运用 AnnAGNPS 模型,对我国南方山区中等尺度流域——福建省九龙江流域进行了农业非点源污染负荷估算和流域管理措施的模拟,利用 4 个典型汇水区校正模型参数,并进一步在九龙江的北溪和西溪两大支流流域验证了模型的适宜性,结果表明,模型对地表径流的模拟能力较对泥沙和氮磷营养盐强,对总磷和泥沙输出的模拟结果表现出了较大的不确定性,尺度较小的典型汇水区模拟精度要高于尺度较大的北溪和西溪流域。鲍锦磊^[61]采用 AnnAGNPS 模型对巢湖马槽河流域的农业非点源污染进行了模拟,由于缺少流

域的常年观察资料,仅与 WARMF 模型对巢湖流域的氮单位面积负荷模拟结果进行了对比验证。高龙华^[62]根据重庆渝北区御临河小流域 2000 年的 7 场降雨实测数据,对 AnnAGNPS 模型参数进行了调试,并对模型的有效性进行了验证。王静^[63]以丹江库区黑沟河流域为研究对象,采用 AnnAGNPS 模型对该流域 2004 年的非点源污染负荷进行了模拟,验证了该模型在丹江库区低山丘陵型流域应用的可行性,通过 5 场降雨事件的比较,发现 AnnAGNPS 模型对总氮的模拟能力较强,模拟偏差在±10%以内;对泥沙的模拟偏差为 4%~27%,模拟精度一般;模型对总磷的模拟表现出较大的不确定性。程炯等^[64]选择珠江三角洲新田小流域为主要研究对象,对流域出口及重要景观单元出口的径流量、总氮和总磷进行了同步观测和模拟估算,结果表明,AnnAGNPS 模型具有较好的模拟效果,在径流量、总氮和总磷的模拟估算中,最小模拟偏差为 1.4%,最大模拟偏差为 34.34%,模拟值与实测值之间具有很好的相关性;在所观测的 4 场降雨中,模拟效果受雨量的影响较为明显,在一定范围内,雨量越大,模拟效果越好,雨量越小,模拟效果越差;不同景观单元由于下垫面性质及其人类活动强度大小影响不同,模拟效果也表现出一定差异,果园+林地景观单元的模拟效果最好,而水田+旱地景观单元的模拟偏差较大。

另外,AnnAGNPS 模型在我国其他地区也有一些应用报道。贾宁凤等^[65-66]以位于黄土丘陵沟壑区的砖窑沟流域为试点,利用 AnnAGNPS 模型进行了土壤侵蚀定量评价,采用流域 8 次径流事件监测数据进行模型检验,径流量和沉积物量的相对误差分别为 10% 和 -10%,AnnAGNPS 模型能够比较理想地模拟流域长期的径流量和沉积物量,并可应用于黄土丘陵沟壑区的径流流失和土壤侵蚀定量评价。邵妍^[67]以距密云水库 5 km 的土门西沟小流域为研究对象,选用 10 场降雨对模型的径流输出进行校验,选 2 场降雨对营养盐的输出进行校验,研究表明,径流量模拟值与实测值的相关性较高;总氮的模拟偏差在可接受范围内,但总磷的模拟不理想,模型的模拟精度与 Novotny 对众多非点源污染模型的评估结果基本相近。李海杰^[68]、赵军海^[69]、陈韦伟^[70]对吉林省双阳水库汇水区流域建立了农业非点源污染 AnnAGNPS 模型,通过单次暴雨事件对模型结果进行验证,结果表明,该模型对总氮的模拟偏差在 10% 以内,说明模型对总氮的模拟能力较

强;对泥沙的模拟偏差在 14%~21%,模拟精度一般;而对总磷的模拟表现出较大的不确定性,个别降雨场次的模拟值与实测值偏差较小,但总体偏差较大,说明对总磷的模拟能力较差。邹桂红等^[71]将 AnnAGNPS 模型应用于非点源污染严重的胶东半岛的大沽河流域(研究区面积为 610.81 km²),分析其在大沽河流域应用的可靠性,并采用流域出口 2001~2002 年径流量、泥沙和总氮监测数据校准和验证模型,结果表明,对地表径流年均模拟的偏差在 15%以内,月均偏差在±30%以内,降雨场次模拟的 R^2 在 0.9 以上;对泥沙输出的年均模拟偏差在±20%以内,月均 R^2 高于 0.7;总氮模拟年均偏差高达 50%,月均和降雨场次总氮负荷的相关系数分别在 0.6 和 0.5 附近波动,模拟结果表现了很大的不确定性。

(2)模型参数敏感性分析。Yuan 等^[46]研究表明,土壤的初始氮浓度和作物的氮吸收率对流域的氮负荷影响最大。Tsou 等^[72]模拟了 Kansas 州的 Bedrock Creek 流域径流和产沙量,结果显示,模型的月径流量和产沙量与观测值非常接近,指出径流曲线数对产流很敏感,进而会影响产沙量,泥沙量对土地利用和农耕措施也非常敏感,准确地预测产沙量需要详细准确的土地利用和农耕措施数据。Sarangi 等^[50]研究表明,径流量对 CN 值最敏感,泥沙流失量对细砂和不稳定的聚集率高度敏感,其与 K 值有关;另外,泥沙流失量对根系密度、表面残留和树冠层覆盖也高度敏感,与 C 值有关。

鲍锦磊^[61]、王静^[63]通过对 AnnAGNPS 模型的 500 余个参数的反复调试,初步发现,影响地表径流量输出的最敏感参数是 CN 值;对于泥沙的输出,降雨动力因子 R 和 Ls 值最为敏感;对于氮磷营养盐的输出,最为敏感的参数为作物管理参数、化肥施用参数和土壤参数。

(3)流域管理措施效果模拟。Yuan 等^[73]在 Deep Hollow 流域模拟了潜在的 BMP 组合对沉积物产量的影响,并进行了成本效益核算。Shilpa 等^[74]运用 AnnAGNPS 模型在 Kansas 州的 Horse-shoe Creek 流域,连续进行了 4 年(1994~1997 年)不同的情景模拟,估算了径流量、沉积物含量和氮、磷的损失,并将所有情景的模拟结果与基于 AGNPS5.0 的模拟结果进行比较,结果表明,在 1994 和 1995 年,AnnAGNPS 和 AGNPS 沉积物的流失量比较接近,然而 AnnAGNPS 模型的预测在模拟缓冲带效益时受到限制。

洪华生等^[8]、黄金良等^[60]运用 AnnAGNPS 模型,对九龙江流域典型汇水区特定集水单元坡地种植退耕返林、西溪流域香蕉地改种双季稻、北溪流域内生猪场全部搬迁的土地利用管理措施分别进行了模拟。高龙华^[62]根据非点源污染的来源和关键源区的标识,将御临河小流域典型汇水区分为 4 个不同的污染控制管理区划,再针对每个区划构建了不同的最佳管理措施,并通过 AnnAGNPS 模型进行了效果模拟。

综观国内外对 AnnAGNPS 模型的研究和应用,在模型适应性检验方面的研究成果较多,对参数敏感性分析和流域非点源管理措施效果模拟的研究成果相对较少或不系统。归纳模型在国内外不同区域或流域的适应性检验成果,可以总结一般规律为:模型对径流和非点源污染的模拟基本在可接受的精度范围内,对于地表径流的模拟能力较泥沙和氮磷营养盐强,对总磷输出的模拟表现出了较大的不确定性;年、月时间尺度模拟精度高于单场降雨的模拟精度;单场降雨雨量越大,模拟效果越好;大尺度区域模拟精度低于小尺度区域;对洪峰流量估计过高等。另外,可以看出,对 AnnAGNPS 模型今后需加强研究的方向有:结合应用区域的实际对模型进行修正或完善,提高模型对径流、泥沙,特别是对营养盐的模拟精度,以及非点源污染管理措施效果模拟的研究等。

3 存在问题 and 研究展望

目前,AnnAGNPS 模型在美国的应用最为成熟,而且已被许多政府部门所接受,并作为土地管理、水质监测等的工具,也证明了模型的科学性和实用性。在我国,目前对模型的适应性和模型对重要参数的敏感性分析研究较多,但由于受到相关数据获取困难等因素的影响,总体上来说,AnnAGNPS 模型在我国的应用还缺乏系统性和连续性,存在以下问题和难点。

(1)模型所用相关数据缺乏。这是制约 AnnAGNPS 模型在我国应用和发展的最主要因素。在美国,许多部门都建立了比较完整的数据库,用户需要时可直接查询。在我国,AnnAGNPS 模型所需相关数据的获得需要研究人员投入大量的时间和精力,并且要有强大的资金支持,如到相关部门购买 DEM 图、土壤图、土地利用图等图件,或实地调查收集水文水质监测数据等。

(2)土地利用具有高度异质性。在美国,从事农

业的人口仅占总人口的 3%, 土地经营以农场为单元, 大面积的土地管理使农田被分割为较大的地块, 作物种植类型和管理都有特定的规划和记录, 这种情况非常有利于模型作物和管理数据库的建立。在我国, 农业人口占总人口的 80%, 且是以家庭为单元的农业生产, 使土地利用被分割为很小的地块, 每个地块有不同的种植类型和管理措施, 很多是随机安排的, 特别是在山区, 破碎的地形更增加了复杂性, 土地利用更具高度异质性。因此, 如何归纳和综合作物及管理数据库, 是模型模拟科学性和实用性的重要因素^[66]。

(3) 研究主要集中于南方地区, 北方地区应用较少。AnnAGNPS 模型在我国多被用于南方地区, 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, 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 AnnGNPS 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。

(4) 对模型的应用缺乏修正或改进。目前, 我国对 AnnAGNPS 模型的应用基本是结合实测数据进行率定和检验后直接使用, 缺乏结合我国实际情况对模型进行必要修正或改进, 以提高模型预测精度的研究和探索。

(5) 流域管理措施效果模拟和评价研究有待加强。我国在这方面虽然做了一些研究工作, 但总体来看缺乏系统性。在合理设计最佳管理措施的基础上, 利用模型模拟各种措施对非点源污染输出削减效果的研究, 需要进一步加强。

[参考文献]

- [1] 胡雪涛, 陈吉宁, 张天柱. 非点源污染模型研究 [J]. 环境科学, 2002, 23(3): 124-128.
Hu X T, Chen J N, Zhang T Z. A Study on non-point source pollution models [J]. Environmental Science, 2002, 23(3): 124-128. (in Chinese)
- [2] 朱继业, 窦贻俭. 城市水环境非点源污染总量控制研究与应用 [J]. 环境科学学报, 1999, 19(4): 415-420.
Zhu J Y, Dou Y J. Total quantity control of non-point source pollution in urban water environment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1999, 19(4): 415-420. (in Chinese)
- [3] 马蔚纯, 陈立民, 李建忠, 等. 水环境非点源污染数学模型研究进展 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(3): 358-366.

- Ma W C, Chen L M, Li J Z, et al. Progress in the research of non-point source pollution models of aquatic environment [J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(3): 358-366. (in Chinese)
- [4] 杨爱玲, 朱颜明. 地表水环境非点源污染研究 [J]. 环境科学进展, 1998, 7(5): 60-66.
Yang A L, Zhu Y M. The study of non-point source pollution of surface water environment [J]. Advances in Environmental Science, 1998, 7(5): 60-66. (in Chinese)
- [5] 邢可霞, 郭怀成, 孙延枫, 等. 流域非点源污染模拟研究——以滇池流域为例 [J]. 地理研究, 2005, 24(4): 549-558.
Xing K X, Guo H C, Sun Y F, et al. Simulation of non——point source pollution in watershed scale: The case of application in Dianchi Lake Basin [J]. Geographical Research, 2005, 24(4): 549-558. (in Chinese)
- [6] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. AGNPS: A non-point-source pollution model for evaluating agricultural watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44(2): 168-173.
- [7] Baginska B, Milne-Home W, Cornish P S. Modelling nutrient transport in currency creek, NSW with AnnAGNPS and pEST [J]. Environmental Modelling & Software, 2003, 18: 801-808.
- [8] 洪华生, 黄金良, 张路平, 等. AnnAGNPS 模型在九龙江流域农业非点源污染模拟应用 [J]. 环境科学, 2005, 26(4): 63-69.
Hong H S, Huang J L, Zhang L P, et al. Modelling pollutant loads and management alternatives in Jiulong River water shed with AnnAGNPS [J]. Environmental Science, 2005, 26(4): 63-69. (in Chinese)
- [9] 郑粉莉, 高学田, 李靖. 农业非点源污染模型 (AGNPS) 用户指南与操作手册 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2008: 1-10.
Zheng F L, Gao X T, Li J. User's guidance and manipulation manual for agricultural non-point source pollution model (AGNPS) [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2008: 1-10. (in Chinese)
- [10] Darden R, Bingner R L. AGNPS2001 input data preparation model, technical reference version 2 [EB/OL]. 2001-01-18. http://www.wedlab.olemiss.edu/AGNPS/reg_download.html.
- [11] Soil Conservation Service. Technical release No. 55: Urban hydrology for small watershed [R]. Washington: USDA, 1975: 215-250.
- [12] Renard K G, Foster G R, Weesies, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [C]. Agriculture Handbook 703 Washington, D. C: USDA—ARS, 1997: 25-28.
- [13] Theurer F D, Clarke C D. Wash load component for sediment yield modeling [C]//Fan S S, Kuo Y H. Proceedings of the fifth federal interagency sedimentation conference. Nevada: Federal Energy Regulatory Commission, 1991: 1-8.
- [14] Bagnold R A. An approach to the sediment transport problem for general physics [R]. Washington, D. C.: USGS, 1966.
- [15] Perrone J, Madramootoo C A. Use of AGNPS for watershed modeling in Quebec [J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40

- (5):1349-1354.
- [16] Perrone J, Madramootoo C A. Sediment yield prediction using AGNPS [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1999, 54 (1): 415-419.
- [17] Grunwald S, Norton L D. Calibration and validation of a non-point source pollution model [J]. Agriculture Water Management, 2000, 45: 17-39.
- [18] Fisher P, Abrahart R J, Herbringer W. The sensitivity of two distributed non-points source pollution models to the spatial arrangement of the landscape [J]. Hydrol Process, 1997, 11: 241-252.
- [19] Feezor D R, Hirschi M C, Lesikar B J. Effect of cell size on AGNPS prediction [C]//ASAE. International Winter Meeting by the American Society of Agricultural Engineers. New Orleans: Am Soc Agric Eng, 1989: 11-16.
- [20] Panuska J C, Moore I D, Kramer L A. Terrain analysis: Integration into the agricultural non-point source (AGNPS) pollution mode [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 46: 59-64.
- [21] Vinux B E, Needhan S. Non-point pollution model sensitivity to grid-cell size [J]. J Water Resources Planning Mgmt, 1993, 119: 141-157.
- [22] Grunwald S. GJS-gestuetzte modellierung des landschaftswasser und stoffhaushaltes mit dern modell AGNPSm [D]. Giessen: Giessen University, 1997.
- [23] Brannan B, Hamlett J M. Using geostatistics to select grid-cell layouts for the AGNPS model [J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(4): 1011-1018.
- [24] Olivieri L J, Schaal G M, Logan T J, et al. Generating AGNPS input parameter using remote sensing and GIS [C]//ASAE: Inter-national Winter Meeting by the ASAE. Chicago: Am Soc AgricEng, 1991: 2622-2628.
- [25] Hession W C, Huber K L, Mostaghimi S, et al. BMP effectiveness evaluation using AGNPS and a GIS [C]//ASAE. International Winter Meeting by the American Society of Agricultural Engineers. New Orleans: Am Soc Agric Eng, 1989: 1-18.
- [26] Needhan S, Vieux B. A GIS for AGNPS parameter input and mapping output [C]//ASAE. International Winter Meeting by the American Society of Agricultural Engineers. New Orleans: Am Soc Agric Eng, 1989: 2673-2678.
- [27] Tim U S, Jolly R. Evaluating agricultural non-point source pollution using integrated geographic information system and hydrologic water quality model [J]. J Environ Qual, 1994, 23: 25-35.
- [28] He C S, Shi C A, Yang C C, et al. A windows-based GIS AGNPS intergace [J]. Am Water Res Assoc, 2001, 37(2): 395-406.
- [29] Leon L F, Lam D C. Integration of a non-point source pollution model with a decision support system [J]. Environmental Modelling & Software, 2000, 15: 249-255.
- [30] Koelliker J K, Humbert C E. Application of AGNPS model to watersheds in Northeast Kansas [R]. Kansas: Kansas State University, 1989.
- [31] Koelliker J K, Humbert C E. Applicability of AGNPS model for water quality planning [C]//ASAE. International Winter Meeting by the American Society of Agricultural Engineers. New Orleans: Am Soc Agric Eng, 1989: 2042-2048.
- [32] Prato T, Shi H. A comparison of erosion and water pollution control strategies for an agricultural watershed [J]. Water Resources Res, 1990, 26(2): 199-205.
- [33] Tim U S, Mostaghimi S, Shanholtz V O. Identification of critical non-point pollution source are as using geographic information systems and water quality modeling [J]. Water Resource Bull, 1992, 28(8): 877-887.
- [34] Rode M. Quantifizierung der phosphorbelastung von fließgewässern durch landwirtschaftliche flächennutzung [D]. Giessen: Giessen University, 1995.
- [35] Grunwald S, Haverkamp S, Bach M, et al. Ueberpruefung von MEKA-massnahmen zum erosions und gewaesserschutz durch das modell AGNPSm (Assessment of MEKA subsidies for soil and water protection by AGNPSm) [J]. J Rural Eng Development, 1997, 38(6): 260-265.
- [36] Mankin K R, Koelliker J K, Kalita P K. Watershed and lake water quality assessment: An integrated modeling approach [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35(5): 1069-1080.
- [37] Bhuyan S J, Marzen L, Koelliker J K, et al. Assessment of runoff and sediment yield using remote sensing, GIS, and AGNPS [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 57 (6): 351-364.
- [38] Bhuyan S J, Koelliker J K, Marzen L J, et al. An integrated approach for water quality assessment of a Kansas watershed [J]. Environmental Modeling & Software, 2003, 18: 473-484.
- [39] Lo K F A. Erosion assessment of large watersheds in Taiwan [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 50 (2): 180-183.
- [40] 于苏俊, 高平平, 何政伟. 基于 GIS 平台的农业非点源污染研究 [J]. 西南交通大学学报, 2002, 37(5): 593-596.
- Yu S J, Gao P P, He Z W. Research on agricultural non-point sources pollution based on GIS [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2002, 37(5): 593-596. (in Chinese)
- [41] 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.
- Cao W Z, Hong H S, Zhang Y Z, et al. Testing AGNPS for water quality modeling in agricultural catchment in southeast of China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, 22 (4): 537-540. (in Chinese)
- [42] 洪华生, 张玉珍, 曹文志. 九龙江五川流域农业非点源污染研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- Hong H S, Zhang Y Z, Cao W Z. Study on agricultural non-point source pollution of Wuchuan Catchment in Upstream Jilulong River [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [43] 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.
- Chen X, Guo X B. Prediction of phosphorus losses for micro-watershed ecosystem by AGNPS model [J]. Transactions of the ASAE, 2000, 16(5): 44-47. (in Chinese)
- [44] 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.
- Zhao G, Zhang T Z, Chen J N. Simulation of cropland erosion control strategies using the AGNPS model [J]. J Tsinghua Univ: Sci & Tech, 2002, 42(5): 705-707. (in Chinese)
- [45] Yuan Y, Bingmer R L, Reibich R A. Evluation of AnnAGNPS on Mississippi Delta MSEA watersheds [J]. Transactions of the ASAE, 2001, 45(5): 1183-1190.
- [46] Yuan Y, Bingner R L, Reibich R A. Evaluation of AnnAGNPS nitrogen loading in an agricultural watershed [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2003, 39(2): 457-466 .
- [47] Suttles J B, Vellidis G, Bosch D D, et al. Watershed-scale simulation of sediment and nutrient loads in Georgia coastal plain streams using the annualized AGNPS model [J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(5): 1325-1335.
- [48] Baginska B, Milne-Home W, Cornish P S. Modeling nutrient transport in Currency Creek, NSW with AnnAGNPS and PEST [J]. Environmental Modelling & Software, 2003, 18: 801-808.
- [49] Shrestha S, Babel M S, Das G A, et al. Evaluation of annualized agricultural nonpoint source model for a watershed in the Siwalik Hills of Nepal [J]. Environmental Modelling & Software, 2006, 21(7): 961-975.
- [50] Sarangi A, Cox C A, Madramooto C A. Evaluation of the AnnAGNPS model for prediction of runoff and sediment yields in St. Lucia watersheds [J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(2): 241-256.
- [51] Polyakov V, Fares A, Kubo D, et al. Evaluation of a non-point source pollution model, AnnAGNPS, in a tropical watershed [J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(11): 1617-1627.
- [52] Shamshad A, Leow C S, Ramlah A, et al. Applications of AnnAGNPS model for soil loss estimation and nutrient loading for Malaysian conditions [EB/OL]. 2007-10-09. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2007.10.006>.
- [53] Zdeněk K, Jirí K, Jakub L. Evaluation of suspended load changes using AnnAGNPS and SWAT semi-empirical erosion models [EB/OL]. 2007-11-29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2007.11.005>.
- [54] 董 亮. GIS 支持下西湖流域水环境非点源污染研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- Dong L. GIS-based nonpoint source pollution modeling in West Lake watershed [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese)
- [55] 郭新波. 红壤小流域土壤侵蚀规律与模型研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- Guo X B. Study on the law and models of soil erosion in red soil watershed [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese)
- [56] 朱 松, 陈英旭. 小流域 N、P 污染负荷的构成比重研究 [J]. 环境污染与防治, 2003, 25(4): 226-227, 252.
- Zhu S, Chen Y X. The pollution of nitrogen and phosphor constitute at small watershed [J]. Environmental Pollution & Control, 2003, 25(4): 226-227, 252. (in Chinese)
- [57] 叶枝茂. 颜公河流域 COD、N、P 污染负荷研究及污染控制对策分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- Ye Z M. Research on pollution load of COD, nitrogen and phosphor and analysis of control measure at the yangong river watershed [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002. (in Chinese)
- [58] 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.
- Wang F E, Lv H C, Chen Y X, et al. Prediction of output loading of nitrogen and phosphorus from Qiandao Lake watershed based on AnnAGNPS model [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 281-284. (in Chinese)
- [59] 吕唤春. 千岛湖流域农业非点源污染及其生态效应的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- Lv H C. Study on agricultural non-point source pollution and its ecological effects in Qiandao Lake watershed [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002. (in Chinese)
- [60] 黄金良, 洪华生, 杜鹏飞, 等. AnnAGNPS 模型在九龙江典型小流域的适用性检验 [J]. 环境科学学报, 2005, 25(8): 1135-1142.
- Huang J L, Hong H S, Du P F, et al. Testing AnnAGNPS for water quality modelling in the typical sub-watersheds in Jiulong River watershed [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(8): 1135-1142. (in Chinese)
- [61] 鲍锦磊. AnnAGNPS 模型在巢湖马槽河流域的应用研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- Bao J L. Study of application of AnnAGNPS model in Machaohe watershed in Chaohu [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [62] 高龙华. 遥感和 GIS 支持下流域非点源污染模型研究 [D]. 南京: 河海大学, 2006.
- Gao L H. Study on non-point source pollution models based on RS and GIS [D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese)
- [63] 王 静. 丹江库区黑沟河流域农业非点源污染研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.
- Wang J. Study on Agricultural non-point source pollution of Heigou watershed in Danjiang reservoir area [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [64] 程 炯, 吴志峰, 刘 平, 等. 珠江三角洲典型流域 AnnAGNPS 模型模拟研究 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 842-846.
- Chen J, Wu Z F, Liu P, et al. AnnAGNPS modeling of agricul-

tural non-point source pollution in the typical watershed of Pearl River Delta [J]. Journal of Agri-Environment Science, 2007, 26(3): 842-846. (in Chinese)

[65] 贾宁凤,段建南,李保国,等. 基于 AnnAGNPS 模型的黄土高原小流域土壤侵蚀定量评价[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 23-27.

Jia N F, Duan J N, Li B G, et al. Soil erosion quantitative evaluation of small watershed in Loess Plateau based on AnnAGNPS model [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(12): 23-27. (in Chinese)

[66] 贾宁凤. 基于 AnnAGNPS 模型的黄土高原小流域土壤侵蚀和养分流失定量评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.

Jia N F. Quantitative evaluation of soil erosion and nutrients loss for small watershed of Loess Plateau based on AnnAGNPS model [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)

[67] 邵 妍. AnnAGNPS 模型在土门西沟小流域退耕还林模拟中的应用[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.

Shao Y. An application study of AnnAGNPS model on returning land for farming to forestry of Tumenxigou Watershed [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006. (in Chinese)

[68] 李海杰. 吉林省双阳水库汇水区农业非点源污染研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2007.

Li H J. Study on agricultural non-point pollution in Shuangyang reservoir catchment of Jilin Province [D]. Jilin: Jilin University, 2007. (in Chinese)

[69] 赵军海. 基于 AnnAGNPS 模型的双阳水库汇水流域农业非点源污染研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2007.

Zhao J H. Study of non-point source pollution in Shuangyang reservoir based on AnnAGNPS model [D]. Jilin: Jilin University, 2007. (in Chinese)

[70] 陈伟韦. AnnAGNPS 农业非点源污染模型在双阳水库汇水流域的应用研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2007.

Chen W W. Study of AnnAGNPS model in Shuangyang reservoir catchment about non-point source pollution [D]. Jilin: Jilin University, 2007. (in Chinese)

[71] 邹桂红, 崔建勇. 基于 AnnAGNPS 模型的农业非点源污染模拟 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 11-17.

Zou G H, Cui J Y. Simulation of agricultural non-point pollution based on AnnAGNPS model [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(12): 11-17. (in Chinese)

[72] Tsou M S, Zhang X Y. Estimation of runoff and sediment yield in the Redrock Creek watershed using AnnAGNPS and GIS [J]. Journal of Environmental Sciences, 2004, 16(5): 865-867.

[73] Yuan Y, Dabney S M, Bingner R L. Cost effectiveness of agricultural BMPs for sediment reduction in the Mississippi Delta [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 57(5): 259-267.

[74] Shilpa B, Mulik P, Kalita K. Water quality assessment for a Kansas watershed using AnnAGNPS model [C]// ASAE. International Winter Meeting by the American Society of Agricultural Engineers. New Orleans; Am Soc Agric Eng, 1989: 2223-2230.

(上接第 224 页)

[11] 赵麦换. 水库补偿效益理论与实践——以黄河干流水库为例 [D]. 西安: 西安理工大学, 2003.

Zhao M H. Theory and application of reservoirs compensation benefits——A case study of reservoirs in mainstream of Yellow River [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2003. (in Chinese)

[12] Tennant D I. In stream flow regimes for fish, wild life, recreation and related environmental resources [J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10.

[13] 余建星, 李彦苍, 吴海欣, 等. 基于熵的海洋平台安全评价专家评定模型 [J]. 海洋工程, 2006, 24(4): 90-54.

Yu J X, Li Y C, Wu H X, et al. Specialists selection model for safety assessment of off shore platforms based on entropy [J]. The Ocean Engineerin, 2006, 24(4): 90-54. (in Chinese)

[14] 郝伏勤, 黄锦辉, 李 群. 黄河干流生态环境需水研究 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005: 18-117.

Hao F Q, Huang J H, Li Q. Study on eco-environment water demand in mainstream Yellow River [M]. Zhengzhou: Yellow River Hydraulic Press, 2005: 18-117. (in Chinese)

[15] 水利部黄河水利委员会. 2003 年黄河水资源公报 [R]. 郑州: 水利部黄河水利委员会, 2004.

Yellow River Yellow River Conservancy Commission. Yellow River water resources communique 2003 [R]. Zhengzhou: Yellow River Yellow River Conservancy Commission, 2004. (in Chinese)