

伊通河流域农业非点源污染对水环境的影响模拟研究

孙晓庆¹, 卞建民¹, 查恩爽², 张琳¹, 陶勇^{1,3}

(1. 吉林大学 环境与资源学院, 吉林 长春 130021; 2. 中核第四研究设计工程有限公司, 河北 石家庄 050021; 3. 吉林省地质环境监测总站, 吉林 长春 130021)

摘要: 针对伊通河流域的农业非点源污染问题,在 GIS 技术和流域基础数据库的支持下,采用 SWAT 模型建立了该区农业非点源污染模型。对研究区农药化肥中的氮、磷元素,泥沙的时空分布状况及总氮进入地下水的状况进行了模拟研究。模拟结果表明该模型精度满足要求。通过模型模拟计算,泥沙的输出量 1985 及 2008 年分别为 7.04×10^6 和 3.46×10^6 t。1985 年总氮和总磷的输出量分别为 20 400 和 2 300 t; 2008 年的输出量分别为 1985 年的 1/2。6,7,8 这 3 个月污染物质输出所占比例较大,约占全年的 90%。同时模拟结果还显示,通过渗透进入地下水的氮量不能被忽视,1985 年和 2008 年通过下渗进入到地下水中的氮量约为当年其他形式输出量的 2.4 和 5.5 倍。

关键词: 伊通河; SWAT 模型; 农业非点源; 氮、磷及泥沙输出模拟; 水污染

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)03-0139-05

中图分类号: X524

Simulative Study of Influences of Agricultural Non-point Source Pollution on Water Resources in Yitong River Watershed

SUN Xiao-qing¹, BIAN Jian-min¹, ZHA En-shuang², ZHANG Lin¹, TAO Yong^{1,3}

(1. College of Environment & Resources, Jilin University, Changchun, Jilin 130021, China;
2. The Fourth Institute of Nuclear Engineering of CNNC, Shijiazhuang, Hebei 050021, China;
3. Jilin Station of Geological Environment Monitoring, Changchun, Hebei 130021, China)

Abstract: According to the agricultural non-point pollution problems in Yitong River, a model of agricultural non-point pollution in this area was constructed using SWAT model with the support of GIS technology and watershed foundation database. The model was used to simulate the temporal and spatial distributions of N, P and sediment, as well as the total nitrogen delivered into groundwater in the study area. Results from the calibration and verification for the model showed that the precision of the model can meet the requirements. Through the calculation of model simulation, sediment yields in 1985 and 2008 were 7.031 6 and 3.458 7 million ton, respectively. In 1985, total nitrogen and phosphorus outputs were 20 400 and 2 300 ton, respectively, and in 2008, was about half of that in 1985. For one year, pollution output from June to August took up 90% of the total amount. The simulation result showed that the amount of nitrogen delivered into groundwater by infiltration was considerable in 1985 and 2008, the amounts of nitrogen delivered into groundwater were 2.4 and 5.5 times of those in other forms of output.

Keywords: Yitong River; SWAT model; agricultural non-point source; output simulation of N, P and sediment; water pollution

农业非点源污染问题由于在空间分布上较为分散、受地理、天气、水文条件影响较大、污染物种类多、迁移转化规律复杂而难以监测。美国环保局 2003 年的调查结果显示,对农业面源污染进行的深入研究取

得了一定的成果^[1]。Hession 等^[2]利用 GIS 和 AGNPS 模型结合,评价了不同作物管理措施对减少农业非点源污染的作用和效果,为最佳农业管理措施 (BMP) 提供了依据。Tim 等^[3]将两种简化污染物输

收稿日期: 2012-05-23

修回日期: 2012-06-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“苏打盐渍土区区域水田开发的盐份迁移响应研究”(41072255); 吉林省自然科学基金项目“灌溉与冻融耦合作用下的吉林西部土壤盐渍化研究”(201115035)

作者简介: 孙晓庆(1986—),女(汉族),吉林省松原市人,硕士,主要从事地下水污染及防治研究。E-mail: sunxiaoqing_110@sina.com。

通信作者: 卞建民(1968—),女(汉族),吉林省延吉市人,教授,博士生导师。主要从事水环境与水生生态研究。E-mail: bianjianmin@126.com。

出模型和 GIS 结合起来,较好地估测了流域内土壤侵蚀、泥沙输送和磷的输出负荷。Brown 等^[4]将 SWAT 模型用于模拟农药施用后在水环境中的迁移转化情况,结果表明,农药施用后初次暴雨导致水体中农药浓度达到最大值,对水质影响非常大。国内学者李怀恩等^[5]提出的蓄满产流、超渗产流及综合产流理论应用于区域农业非点源污染的产流计算,比较适合中国的国情。孙峰等^[6]在官厅水库流域和黄河流域下游卢氏流域应用 SWAT 模型对径流、泥沙和氮污染负荷进行了模拟,并对不同管理措施的效果进行了模拟分析。万超等^[7]在潘家口水库流域应用 SWAT 模型对不同水平年进行了面源污染负荷计算,并分析了施肥对面源污染负荷的影响。

伊通河对沿岸城市居民的生产、生活有着重要的意义。近年来,为增加耕种面积在流域范围内大面积地毁林开荒,为增加农产品产量大量投入农药、化肥等,已经诱发了该区水土流失及水质污染等水资源环境问题。针对上述问题,本文采用 SWAT 模型建立了该区农业非点源污染模型,进行了氮、磷、泥沙等输出模拟,分析了污染物的时空分布特征及对水资源的污染状况。通过研究,明确了伊通河流域农业非点源污染的现状及其原因,对今后研究区水资源的合理利用及农业的可持续发展具有重要的实践指导意义。

1 研究区背景及主要问题

伊通河发源于吉林省伊通满族自治县板石庙乡青顶子岭北,是第二松花江的二级支流饮马河的最大支流,于长春市乐山镇柳罐印子屯流入长春境内,是

唯一一条贯穿长春城区的河流,流域面积为 8 440 km²,河长 342.5 km,多年平均径流量 5.48 × 10⁸ m³,位于中游的新立城水库,是长春市区工农业和生活用水的重要水源。

近年来,由于人口猛增,粗放式农业无限发展,林地几乎变为旱田,沼泽地全部变为水田,耕种面积由 2006 年的 2.01 × 10⁵ hm² 增加到 2011 年的 8.57 × 10⁵ hm²^[8],生态平衡遭到破坏,水土流失日益严重,水环境污染问题愈加突出。在长春市以南,伊通河主流和支流上修建塘坝水库,使涵养水源的资源严重匮乏。伊通河除上游水厂坝断面的水质情况较好属于Ⅲ类水之外,市区及市区下游河段均属严重污染河段,属于Ⅴ类水^[9],其中 1999 年河水中主要污染物铵态氮的全年平均污染超标倍数高达 14.8^[10]。

近年来,随着伊通河流域的非点源污染越来越受到关注,国内多位学者采用不同的方法对该区进行了研究。结果表明,长春市地表水质量总体较差、污染较重,面源污染所占污染物的比重较大^[11]。水库入库总磷超过允许入库总磷约 6 倍,而且非点源总磷是水库最大污染源,占总磷污染的 92%^[12]。无论是丰水期还是枯水期,伊通河中上游的长春和农安断面总氮和总磷含量均远远大于河流其他监测断面^[13]。

2 数据及研究方法

2.1 数据来源

SWAT 所需的数据主要包括空间数据和属性数据,前者包括 DEM 数据、土地利用数据以及土壤类型数据等,后者包括天气数据等(表 1)。

表 1 数据来源情况

数据类型	数据内容	数据来源	获得方法
DEM 高程	90 m × 90 m 的栅格文件	遥感解译	MapGIS 6.7 软件
土地利用类型图	1986, 1995, 2000 和 2008 年土地利用数据	遥感解译	MapGIS 6.7 软件
土壤类型	土壤亚类主要包括黑土、草甸黑土、黑钙土、石灰性黑钙土等	南京土壤所 1:100 万中华人民共和国土壤图数据库	对于土壤粒径的转换借助 MATLAB 软件采用“pchip”即分段 3 次 Hermite 多项式插值进行计算
气象	1985—2008 年的逐日气象资料	气象科学数据共享服务网	网络查询
施肥状况	氮肥主要有尿素、碳酸氢铵、硫酸铵等,复合肥主要为磷酸二铵	当地居民及资料查阅	实地调查及网络查询

本研究中,DEM 数据输入首先借助 ArcGIS 9.2 中的 ArcToolbox 的 fill 模块对 DEM 数据进行填洼处理,其后将 DEM 数据载入 SWAT 模型进行计算。流域 DEM 见图 1。

模型所需的土地利用类型图,首先借助图像处理

模块将图片格式转换为 .msi 格式的栅格文件,对影像进行拼接和裁剪处理。其次对图像进行增强处理,图像滤波,图像运算等前期处理操作,在此基础上根据既定坐标对光栅文件进行配准。最后建立遥感解译标识,进行人机交互式解译,将影像图矢量化处理,

并编辑属性。将解译完成的图片格式转换成 SAWT 模型所需的 .shp 格式并导入模型进行运算。

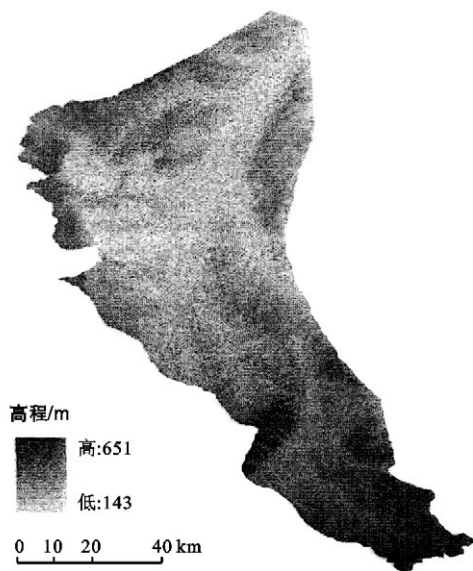


图 1 伊通河流域高程分布

伊通河土壤类型数据库根据全国土壤普查办公室 1995 年编制并出版的《1:100 万中华人民共和国土壤图》,采用了传统的“土壤发生分类”系统,基本制图单元为亚类^[9]。将此土壤类型图输入模型为模拟提供背景数据支持。

选用研究区内或附近的扶余站、四平站、长春站、烟筒山站和吉林市站的天气资料^[10];土壤模型自带的土壤数据库数据位于安装目录下的 SWAT 2005 文件的 usersoil 表中。

研究区内农田面积约 $2.81 \times 10^5 \text{ hm}^2$,其中旱田约占 4/5,施肥方式主要是基肥和追肥,农田投入有机肥较少,化肥施用强度约为 696.9 kg/hm^2 。

2.2 研究方法

SWAT(soil and water assessment tool)模型是由美国农业部(USDA)农业研究中心(ARS)开发的流域尺度分布式水文模型,内容涉及流域水平衡、流量预测及非点源污染等诸多方面,主要用来模拟较长时间段内复杂流域内不同土壤、土地利用与管理方式下产生的水、泥沙与营养物的变化^[11],预测人类活动对水、沙、农业、化学物质的长期影响。

SWAT 模型结构复杂,包含水文、气象、泥沙、土壤、作物生长、营养物和农业化学品等 8 个部分^[12],分为水文过程子模型、土壤侵蚀子模型和污染负荷子模型等^[13]。水文过程子模型可以模拟计算流域水文循环过程中降水、地表径流、层间流、地下水流以及河

段水分输移损失等部分^[14]。土壤侵蚀子模型中对降水和径流产生的土壤侵蚀作用通过修正的通用土壤流失方程(RUSLE)获取,使用径流量来模拟侵蚀和泥沙产量^[15-18]。污染负荷子模型主要进行氮、磷循环模拟,这 2 个循环伴随水文过程和土壤侵蚀过程而发生。

本次模拟研究采用 ArcGIS 版本的 SWAT 2005,在 ArcGIS 中添加 SWAT 工具条,建立工程文件。

根据数据资料情况以及研究区特征,输入研究区 DEM 高程数据、研究区边界(mask)数据以及流域水系数据,然后设定子流域集水面积阈值和子流域进出口点位,划分子流域,将研究区划分为 24 个子流域。按照顺序导入土地利用类型图、土壤类型图,并根据土地利用类型的属性和土壤类型图的属性与各自的分类表链接,进行重新分类,坡度以 1% 为界线分为 2 类。输入天气发生器文件,之后分别输入降水、温度、相对湿度、太阳辐射、风等气象情况的文件。在气象数据输入之后,可以通过“write all”将所有参数写入模型,之后通过“Edit SWAT Input”模块对水库和农药化肥等的相关参数进行定义。化肥管理方面,经过实际调查和资料查找,得知研究区有机肥施用极少,主要是以氮为主的化学肥料,施用强度为 $680 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

3 模型校正及结果讨论

3.1 模型校准与验证

模型校准采用 SWAT 自带的 SCE—UA 分析方法,该方法优化参数是从样本总体中对可优化参数进行随机抽样,将总体分成若干个组合体,每个组合体单独地使用单纯形法则,之后这些组合体被周期性地混合,产生新的组合体来获取新信息,这种方法能够有效地搜索所有参数空间直到参数总体达到最优化^[11]。参数率定后利用 1985 年及 2008 年流量资料分别对模型进行校准及验证(图 2—3)。

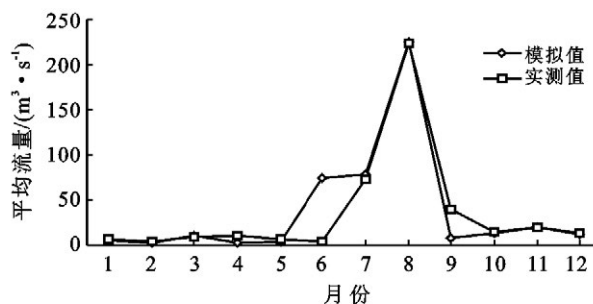


图 2 1985 年伊通河月径流量模拟值与实测值对比

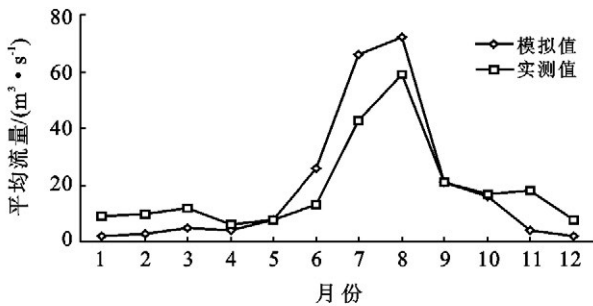


图 3 2008 年伊通河月径流量模拟值与实测值对比

在 2008 年 6—9 月的模型验证中,模拟值高于实测值的情况,主要由于该年研究区降水量仅为 5.5 mm,不到常年同期的 1/2,气温则比同期偏高,导致土壤缺墒严重,在农作物生长期研究区进行了农业引水工程,造成在此期间月径流实测值较模拟值偏低。但图 2—3 中,年内流量模拟值与实测值的相关系数分别达到了 0.88 及 0.89,拟合程度较高,达到了精度要求,表明该模型在研究区可用,其模拟结果具有一定的准确性。

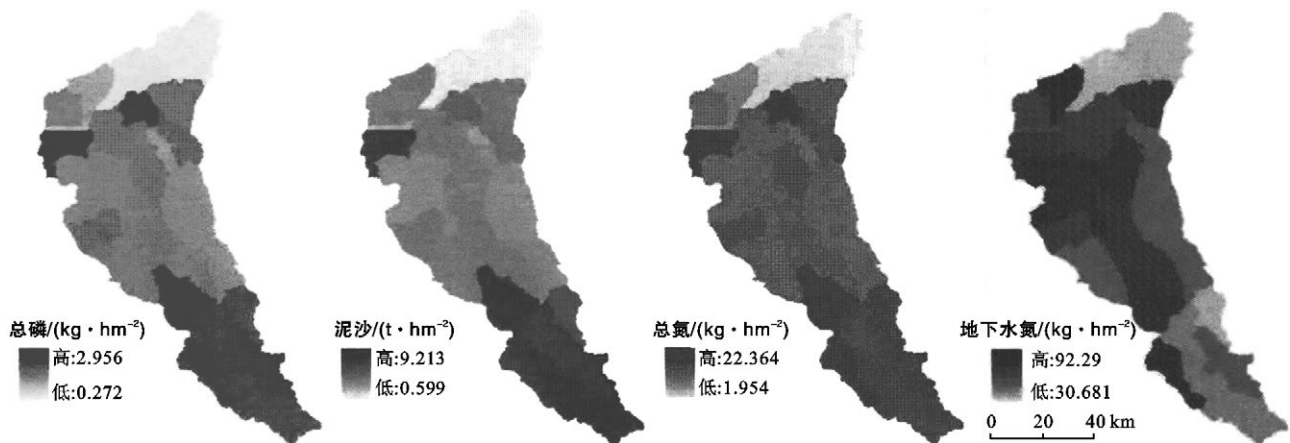


图 4 2008 年伊通河污染物输出分布

由图 4 可以看出,氮、磷的输出分布呈现相似的规律性,因为两者的主要来源都是肥料的施用,输出强度也呈现一致的规律性,西部大于东部,其原因可能是伊通县和农安县分别为国家和吉林省商品粮基地,耕地面积大,化肥、农药施用量大,造成流失严重,虽然河流的上游林地覆盖面积比较大,但上游处于丘陵区,坡度较大,径流的冲刷及搬运能力较强。流域出口处氮、磷的输出强度较小,因为多年前伊通河水量较大、河床较宽、地势极为平坦,现今出口处位于古河床,而且伊通河水量减少,下游基本断流,河流搬运能力减弱、地表径流侵蚀能力弱。

研究区内泥沙输出在 $0.599 \sim 9.213 \text{ t/hm}^2$,输出量最小的区域位于长春市区周围及流域出口。长春

3.2 污染物多年变化规律

为了解研究区农业非点源污染输入地表水体的总体情况,对 1985 和 2008 年的泥沙、总氮、总磷等污染物模拟结果及产水量进行统计,结果如表 2 所示。

表 2 1985 和 2008 年伊通河流域农业非点源污染模拟结果

年份	变量				
	降水量/ mm	产水量/ 10^8 m^3	泥沙/ 10^4 t	总氮/ 10^4 t	总磷/ 10^4 t
1985	814.16	19.29	703.16	2.04	0.23
2008	692.74	7.55	345.87	1.05	0.11

由表 2 可知,1985 及 2008 年总氮的输出量分别为 2.04×10^4 和 $1.05 \times 10^4 \text{ t}$,总磷的输出量分别为 2.30×10^3 及 $1.10 \times 10^3 \text{ t}$ 。而且,这 2 a 的泥沙输出量均较大,1985 年污染物的输出大于 2008 年,氮输出量远大于磷。

3.3 污染物空间分布特征

在初步了解污染物输出与时间关系的基础上,根据 SWAT 模型模拟的结果输出对 2008 年污染物输出进行统计,主要绘制总氮、总磷、泥沙输出空间分布图及地下水氮强度空间分布图(见图 4)。

市区多为建筑用地,地表多为建筑、道路等覆盖,土壤侵蚀作用弱,而流域出口处地势平坦,地表径流的搬运能力弱,伊通河经过市区后,水量削减较大,河流的侵蚀力减弱。泥沙输出较高地区位于农安县西部及伊通县,伊通县作为伊通河的发源地,地形相对较陡,水流流量较大,流速快,对地表冲刷作用较强,泥沙输出强度较大。

由以上分析看出,在时间上,磷的输出量变化规律与泥沙一致;在空间上,磷的输出强度与氮一致。

3.4 进入地下水的氮含量

农业非点源污染问题是因地表水污染而引起关注,但从模拟结果看,研究区由下渗进入地下水的氮量很可观。1985 和 2008 年,下渗氮量分别为 55.18,

66.53 kg/hm²。以2008年结果为例研究进入地下水和地表水的氮输出的年内分布(如图5所示)。由图5可知,两者趋势一致,进入水源中的氮最大量主要发生在6—8月,但在4—10月内进入地下水的总氮量远远大于进入地表水的氮量,7月份的下渗量分别约为27.3和4.6 kg/hm²,可见氮的流失主要是渗入地下水。

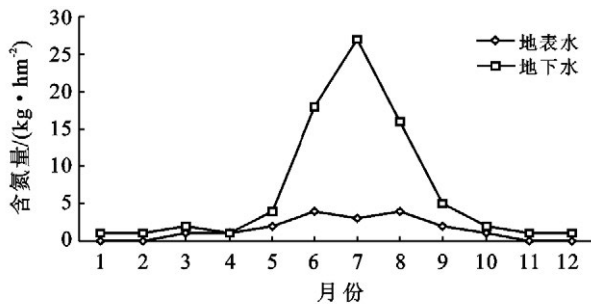


图5 2008年进入地下水氮量和进入地表水含氮量对比

4 结论

(1) 通过对研究区总氮、总磷及泥沙的时空输出强度的模拟,明确了该区农业非点源污染问题的严重性。主要原因可分为自然及人为因素两方面:模型模拟期间研究区降雨量较大导致地表冲刷强度较大,氮、磷及泥沙等随着降雨径流进入到地表水中造成污染。此外,多年来当地农民追求农业增产而大量开垦农田,增施氮磷肥等,导致污染元素的增加及渗漏到地下造成地下水污染问题的发生。

(2) 通过 SWAT 模型对伊通河流域的氮、磷元素及泥沙进行时空分布的模拟,氮、磷从河流上游到下游输出量呈现“大—中等—较大—小”的变化规律,西部大于东部,总氮的最大输出强度为 22.364 kg/hm²,总磷的最大输出强度为 2.956 kg/hm²。

(3) 通过 SWAT 模型对伊通河流域渗入地下水的氮素量的模拟结果,研究区氮的流失主要是渗入地下水,进入地下水的氮以中、下游较高。较大的下渗量通常发生在地势平坦、降水入渗能力较强、降水入渗系数较高的地区。

[参 考 文 献]

[1] 邓雄. 农业非点源污染的研究进展、存在的问题及发展[J]. 中山大学学报, 2007, 46(S2): 244-247.

[2] Hession W C, McBride M, Bennett M. Statewide non-point source loads in the reservoir watershed using the GIS/GPS/RS information technologies and numerical models[J]. Water International, 2001(2): 239-251.

[3] 郝芳华, 程红光, 杨胜天. 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, 2006.

[4] Brown D, Hollis J M. SWAT—a semi-empirical model to predict concentrations of pesticides entering surface waters from agricultural land[J]. Pesticide Science, 2001, 47(1): 41-50.

[5] 李怀恩, 沈晋. 非点源污染数学模型[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1996: 5-16.

[6] 孙峰, 郝芳华. 基于 GIS 的官厅水库流域非点源污染负荷计算研究[J]. 北京水利, 2004(1): 16-18.

[7] 万超, 张思聪. 基于 GIS 的潘家口水库面源污染负荷计算[J]. 水力发电学报, 2003, 81(2): 62-68.

[8] 谷晓林. 松花江流域重点支流——伊通河生态环境需求及生态补水研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.

[9] 王洪鑫. 伊通河地表水环境质量评价[J]. 吉林水利, 2005(7): 13-15.

[10] 韩桂荣, 王立国, 昌镜伟. 伊通河水质污染状况分析[J]. 吉林水利, 2001(8): 11-13.

[11] 高文武. 长春市地表水体环境质量现状及治污减排远景目标预测[D]. 长春: 吉林大学, 2009.

[12] 沈万斌, 刘景帅, 杨育红, 等. 新立城水库总磷优化管理[J]. 水资源保护, 2010, 26(5): 20-24.

[13] 庞靖鹏, 徐宗学, 刘昌明. SWAT 模型研究应用进展[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 31-35.

[14] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool user's manual, version 2000[S]. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple, Texas. GSWRL report 02-02. U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, College Station, TX, 2002.

[15] 张益智, 赫颖. 新立城水库非点源污染的研究[J]. 吉林水利, 1994(8): 31-33.

[16] 原杰辉. SWAT 模型在农业非点源污染研究中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2009.

[17] 关作正, 石岚, 徐丽娜. 黄河流域托万区间 SWAT 模型土壤属性数据库的建立[J]. 内蒙古水利, 2009(4): 5-7.

[18] 查恩爽. 伊通河流域农业非点源污染模拟及最佳管理措施的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2011.