

基于 L-T HIA 模型的密云水库地区非点源污染空间分布特征

沈 涛^{1,2}, 刘良云², 马金峰^{1,2}, 李存军², 王纪华^{2*}

(1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院遥感与地理信息系统研究中心, 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; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089)

摘 要: 农业生产营养物质的输出是造成水环境污染的重要原因之一。该文以北京密云水库周边地区为研究区域, 基于土地利用、土壤以及降水等下垫面信息, 利用长期水文影响评价(The Long-Term Hydrologic Impact Assessment, L-T HIA)模型, 估算研究区内污染物的长期平均输出负荷, 并分析其空间分布特征。研究结果表明: 不同土地利用类型的污染物输出负荷是不同的, 其中以农用地对研究区内非点源污染的影响最大。结果表明, 在流域规划和管理中使用 L-T HIA 模型分析农业非点源污染的空间分布是可行的。

关键字: L-T HIA 模型; 非点源污染; 土地利用

中图分类号: X52; X53

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)5-0062-07

沈 涛, 刘良云, 马金峰, 等. 基于 L-T HIA 模型的密云水库地区非点源污染空间分布特征研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 62- 68.

Shen Tao, Liu Liangyun, Ma Jinfeng, et al. Spatial distribution characteristics of non-point pollution of Miyun reservoir areas based on L-T HIA model[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 62- 68. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

非点源污染是土壤中的氮素、磷素、农药以及其他有机或无机污染物, 大气干湿沉降、城区及道路污染物等, 在降水过程中通过地表径流和地下渗流, 进入地表及地下污染水体。非点源污染是水生态系统健康恶化的主要原因之一, 因此必须对其进行控制与管理^[1,2], 而首要的任务就是对非点源污染的时空分布特征进行准确地监测。密云水库总贮量可达 43.5 亿 m³, 是北京市最大的城市生活用水基地, 担负着向首都提供生活用水的特殊任务, 关系着首都发展和社会稳定。

中国的专家学者已经相继在于桥水库^[3]、滇池^[4]、太湖^[5]、巢湖^[6]、苏州河^[7]等地方开展了非点源污染研究工作, 取得了丰富的成果。而且, 已经有不少学者对密云水库及其周边小流域的非点源污染的负荷、流失规律以及污染评价等方面进行了研究。认为非点源污染负荷对水库水质的“贡献”最大, 在密云水库年总负荷量中,

COD 的 73%、BOD 的 71%, 氨氮的 94%、总氮的 75% 及总磷的 75% 均来自非点源污染, 非点源污染是造成水库污染的主要原因^[8]。在对密云水库石匣小流域不同土地利用类型非点源污染发生区的降雨、径流、水质同步监测的基础上, 分析了研究区不同土地利用方式与氮磷流失之间的关系^[9]。根据同步监测数据, 利用通用土壤流失方程和 SCS 法分别计算不同土地利用类型区土壤侵蚀量和径流量, 并分析氮、磷的流失特点, 并指出村庄和坡耕地是氮、磷流失的重点区域^[10]。利用密云水库两大入库河流常规监测数据, 估算其非点源污染负荷, 并对非点源污染负荷的时空分异规律进行了初步分析^[11]。采用经过参数率定和模型验证的密云水库流域非点源 SWAT 模型系统, 对非点源污染时空变化、负荷关键区进行了识别, 并针对不同的流域管理情景进行了情景分析^[12]。但是, 这些研究都是建立在大量的实测数据的基础上的, 虽然比较准确地反映了研究区内的现实情况, 却要耗费大量的人力物力财力, 不可能实现对研究区的经常监测, 推广价值有限。本研究试图使用易于推广的模型方法, 结合易于得到的遥感数据和气象数据, 对研究区进行了污染物负荷研究, 并取得了良好结果。

1 研究区概况

研究区域位于密云水库及周边地区。密云水库汇水河流除潮河、白河外, 还有蛇鱼川河、白马关河、牯牛河、安达木河、清水河等支流或季节性河。密云水库流域属

收稿日期: 2006-10-26 修订日期: 2007-05-12

基金项目: 农业部“农业面源污染信息系统与监测预警”项目(农业环境监测 070405); 北京市自然科学基金重点项目“基于 3S 技术的京郊农田环境监测与决策支持”(4061002)

作者简介: 沈 涛(1976-), 男, 山东郓城人, 博士生, 主要从事遥感与地理信息系统等方面的研究。北京 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 100875。Email: st_crazy@163.com

*通讯作者: 王纪华(1958-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事遥感的农业应用及作物的生理生化研究。北京 国家农业信息化工程技术研究中心, 100089。Email: wangjh@nercita.org.cn

暖温带半湿润季风型气候, 四季分明, 干湿变化明显, 年平均气温 $8 \sim 10^{\circ}\text{C}$, 中低山低于 6°C , 年日照总时数 801.8 h , 年辐射总量 135.3 kcal/cm^2 , 平均年降水量为 660 mm , 地区分布不均, 自西南向北、东北逐渐减少, 降水的季节变化明显, $6 \sim 8$ 月的降水量占全年降水量的 76.5% , 降水多以暴雨形式出现, 降雨强度大、侵蚀力强, 加之坡度大、土层薄, 极易形成水土流失, 为流域非点源污染的发生提供了动力。研究区地貌以山地、丘陵为主, 丘陵区主要分布在潮河流域及水库周边, 占整个流域面积的 4.9% , 土壤类型为淋溶褐土。中低山分布在水库西北、东北部, 占整个流域面积的 74.8% , 其中低山土壤类型为淋溶褐土, 中山土壤类型为棕壤。河流发育呈树枝状, 地势西北高、东南低, 河流走向与山脉走向基本一致。光热资源丰富, 垦殖率在 $30\% \sim 50\%$ 之间, 特别是阶地、河漫滩等地块较大, 适宜农作物和果树生长。区内植被茂密, 覆盖率多在 90% 以上, 为暖温带落叶阔叶林区^[13]。

2 基于 L-T HIA 模型的非点源污染负荷定量研究

2.1 长期水文影响评价模型

基于 SCS CN (Curve Number) 法^[14]发展而来的长期水文影响评价 (Long-Term Hydrologic Impacts Assessment, L-T HIA) 模型, 能够利用某区域长时期的气候、土壤和土地利用数据, 计算该区域的年均径流量和非点源污染负荷。L-T HIA 模型利用美国土壤保持局的 SCS 曲线号码 (Curve Number, CN) 法计算地表径流或超渗降雨, 该模型估算的是流域径流的直接径流部分, 不包括土壤渗漏后形成的底流部分。基于长周期的水文序列可以了解流域不同暴雨级别的平均径流及污染物产出状况, 而不是某一暴雨的径流和污染物输出, 因此对流域规划和管理具有很好的指导意义。

1) SCS 模型的基本原理

美国土壤保持局提出的 SCS 径流模型^[15]能反映不同土壤类型、不同土地利用方式及前期土壤含水率对降雨径流的影响, 它具有简单易行、所需参数较少、对观测数据的要求不很严格的特点, 是一种较好的小型集水区径流计算方法。它是基于集水区的实际入渗量 (F) 与实际径流量 (Q) 之比等于集水区该场降雨前的最大可能入渗量 (或潜在入渗量 S) 与最大可能径流量 (或潜在径流量 Q_m) 之比的假定基础上建立的, 即

$$\frac{F}{Q} = \frac{S}{Q_m} \quad (1)$$

式中 Q_m ——假定潜在径流量, 为降雨量 (P) 与由径流产生前植物截流, 初渗和填蓄水构成集水区初损 I_a

的差值, 即: $Q_m = P - I_a$, 实际入渗量为降雨量减去初损和径流量, 即: $F = P - I_a - Q$

则有

$$\frac{P - I_a - Q}{Q} = \frac{S}{P - I_a} \quad Q = \frac{(P - I_a)^2}{S + P - I_a}$$

为了简化计算, L-T HIA 模型假定集水区该场降雨的初损 I_a 为该场降雨前潜在入渗量的 0.2 倍, 即: $I_a = 0.2S$, 则有:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{0.8S + P} \quad (Q = 0, P \leq 0.25S) \quad (2)$$

由此可以看出: 集水区的径流量取决于降雨量与该场降雨前集水区的潜在入渗量, 而潜在入渗量又与集水区的土壤质地、土地利用方式和降雨前的土壤湿润状况有关, SCS 模型通过一个经验性的、综合反映上述因素的参数 CN 来推求 S ^[16], 即:

$$S = \left| \frac{254000}{CN} \right| - 254 \quad (3)$$

由公式可以看出: CN 值越大, S 值越小, 越易产生径流; 反之, 则不易产生径流。

2) CN 值的影响因素及确定方法

CN 值是 SCS 模型的主要参数, 是用于描述降雨—径流关系的参数。 CN 值把流域下垫面条件定量化, 用量的指标来反映下垫面条件对产流、汇流的影响。 CN 值是土地利用类型、土壤类型、土壤前期湿润程度的函数。因此, 确定研究区域的土地利用类型、土壤类型和土壤前期湿润程度是模拟过程的首要任务。

理论上, CN 取值介于 $0 \sim 100$ 之间, 但在实际条件下, CN 值在 $30 \sim 100$ 之间变化, 根据土壤特性不同, 美国土壤保持局根据土壤的渗透特征将 8500 多种土壤类分别归为 A、B、C、D4 类, 并由此确定其 CN 值 (表 1)。

表 1 CN 值的确定

Table 1 Definition of the curve numbers

土壤水文类别	含 义
A	易产生高渗透无径流的土壤 (沙、砾石)
B	易产生中等渗透少径流的土壤 (粉砂壤土)
C	易产生少渗透中等径流的土壤 (砂土)
D	易产生低渗透高径流的土壤 (粘土)

由于临前降雨导致的土壤水分变化对径流模拟有很大影响, CN 值需要做相应的校正, 故引入了前期降水指数 AMC (Antecedent Moisture Condition, AMC), 其计算公式为:

$$AMC = \sum_{i=1}^5 P_i$$

式中 P_i ——前 5 d 累计降水量, mm 。根据前期降水指数 AMC , 将土壤前期降水水分条件划分为 I (干燥),

II(中等),III(湿润)3 种类型(表 2)。

表 2 AMC 的确定

Table 2 Definition of the Antecedent Moisture Condition(AMC)		
AMC	5 天临前降水/mm	
	作物休眠期 (定义为 10 月 15 日开始)	作物生长期 (定义为 4 月 15 日开始)
I	< 13	< 36
II	13~ 28	36~ 53
III	> 28	> 53

前期干旱和湿润的条件下的 CN 可按式修正 (DN2 可查表得到):

AMC I(土壤干): $CN1 = 4.2CN2 / (10 - 0.058CN2)$

AMC III(土壤湿): $CN3 = 23CN2 / (10 + 0.13CN2)$

2.2 密云水库流域非点源污染负荷模拟

2.2.1 技术路线图

通过 L-THIA 模型分别计算多年平均径流量,通过该区土地利用与地表径流面源污染物浓度的定量关系,采用 GIS 的空间分析与统计方法,可以估算两个时段面源污染产出的特征。

L-THIA 模型结构与输入参数如图 1^[17]所示。

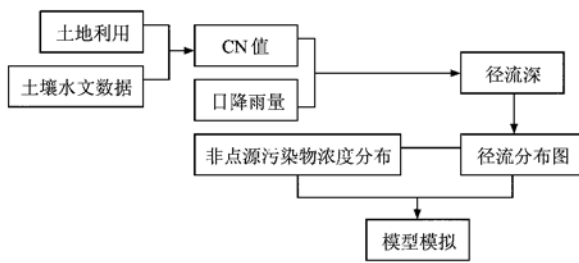


图 1 L-THIA 模型模拟流程

Fig. 1 Simulation process of the L-THIA model

2.2.2 资料收集与整理

土地利用采用 TM/ETM 遥感影像解译,参照该区土地利用图进行目视解译,选择的时相为 2001 年。土壤 SCS 类别根据北京市有关土壤种粒度及质地参数来确定,并将 SCS 类别和土壤类型图进行连接,获得土壤的 SCS 类别图。流域内 20a 的降水数据通过北京市气象局获取。

1) 土壤水文数据

L-THIA 模型的土壤水文数据输入要按照 CN 值的确定规则,因此结合研究区的土壤类型图,按照规则将密云区土壤水文条件归类,并在 ARCVIEW 软件中生成相应的土壤水文图(图 2)。

2) 土地利用数据和气象数据

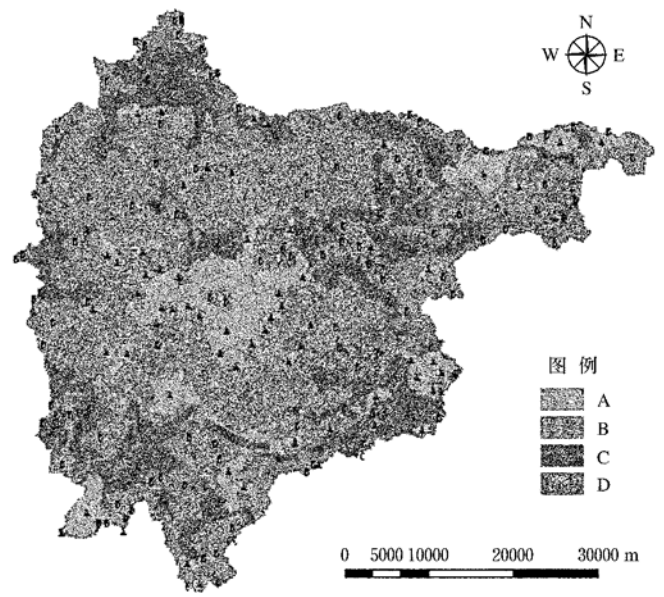


图 2 研究区土壤水文图

Fig. 2 Soil hydrologic map of the study area

土地利用采用研究区 2001 年的一景 TM 遥感影像解译,参照该区土地利用图进行监督分类。TM 影像的空间分辨率为 30 m,为中等分辨率影像,采用监督分类的方法得到土地利用图可以很好地满足区域或流域尺度的各种应用。分类在 ENVI 软件中进行并进行格式化转化,获得模型输入格式的土地利用图。气象数据采用密云气象站连续 20a 的逐日观测数据。

土地利用图和计算而得的 CN 值分布图如图 3、图 4 所示。

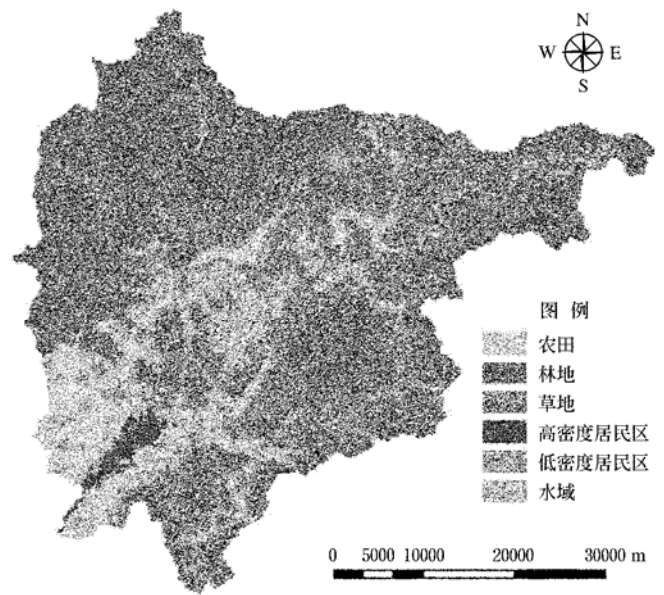


图 3 研究区土地利用图

Fig. 3 Land use map of the study area

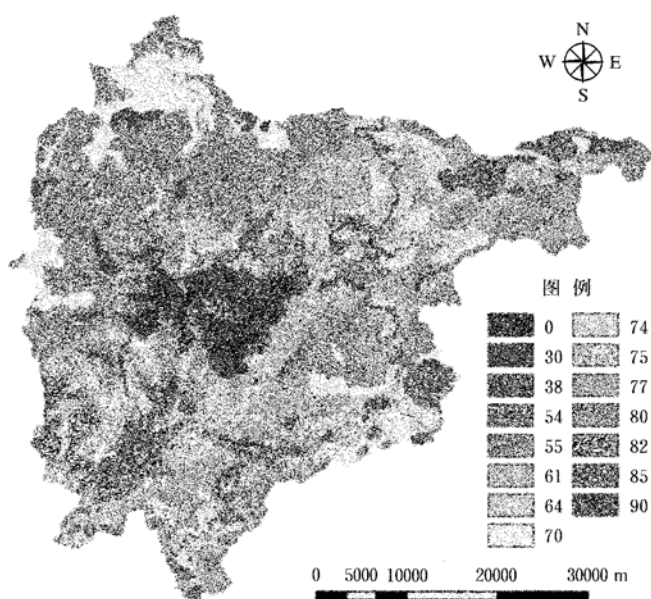


图4 研究区 CN 值分布图

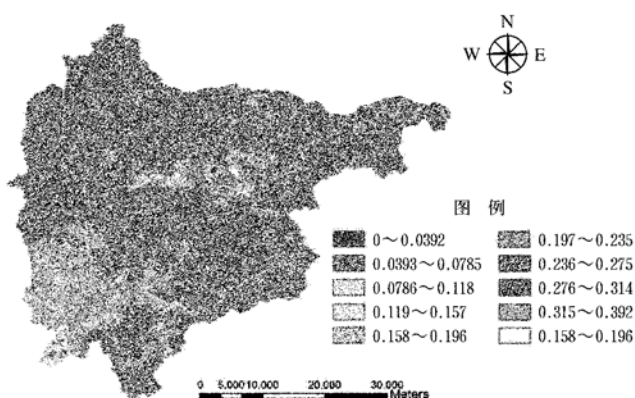
Fig. 4 Distribution map of the CN value in the study area

3 结果与分析

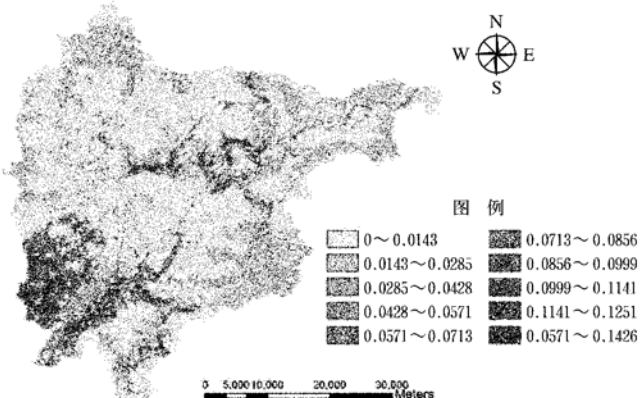
3.1 L-T HIA 模型模拟研究区非点源负荷空间分布

在 ARCVIEW 中载入 L-T HIA 扩展模块并按其步骤进行研究区内非点源污染负荷的模拟。基于 L-T HIA 模型模拟非点源污染物浓度分布, 主要能够模拟 15 种污染物, 根据研究需要, 在模拟结果中主要选择全氮、全磷、溶解态磷、硝态氮、生物需氧量 (BOD)、化学需氧量 (COD) 6 种污染负荷进行分析。图 5 为 6 种污染负荷的空间分布。

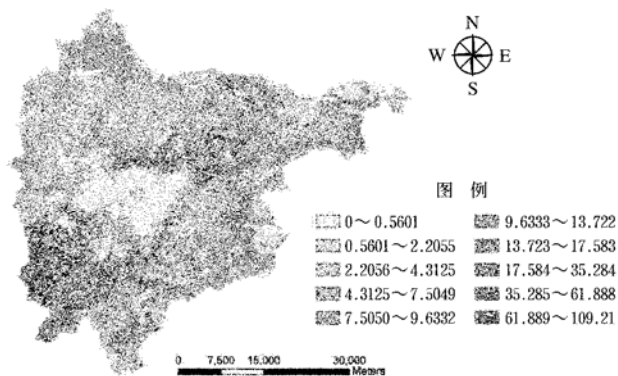
L-T HIA 模拟非点源污染负荷的步骤: 首先, 将预处理好的土地利用分类和土壤分类数据调入模型, 进行格式转换; 其次, 进行 CN 值的计算, 即 L-T HIA 根据转换好的 2 个文件计算出研究区每个像元的 CN 值。然后, 运行 L-T HIA, 计算研究区的年均径流深, 进而模拟研究区的年均径流量。最后, 输出非点源污染物的浓度分布图。



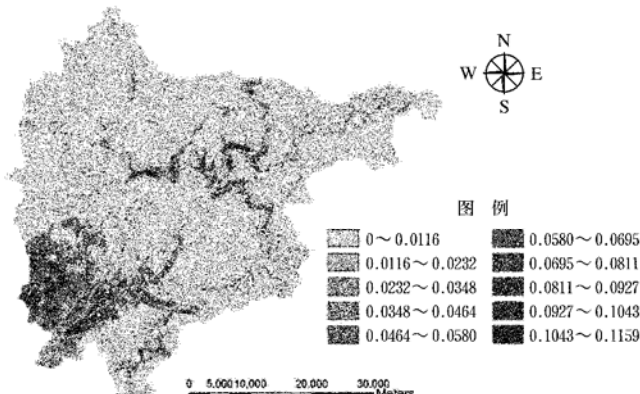
a. 全氮



b. 硝态氮



c. 溶解态磷



d. 全磷

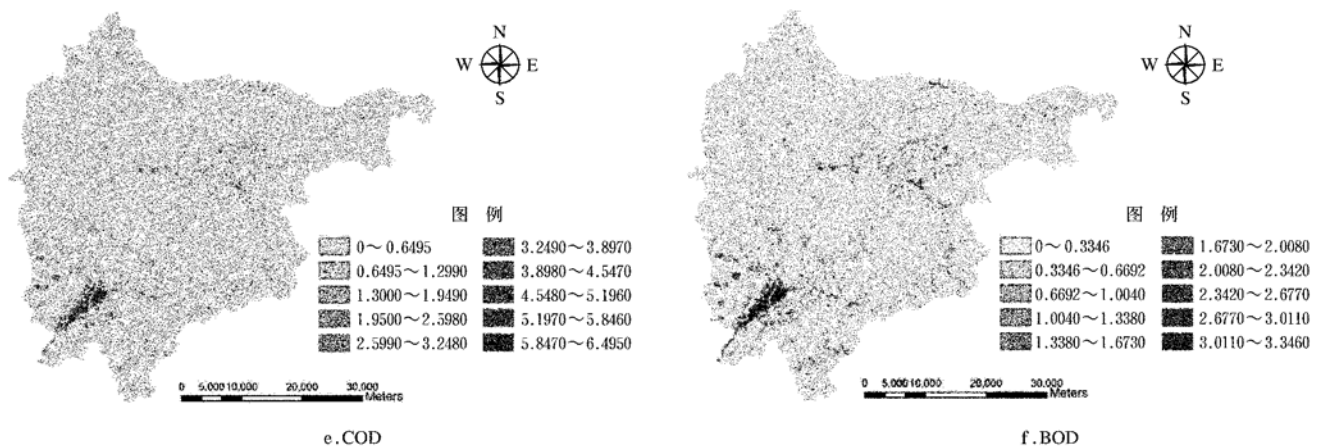


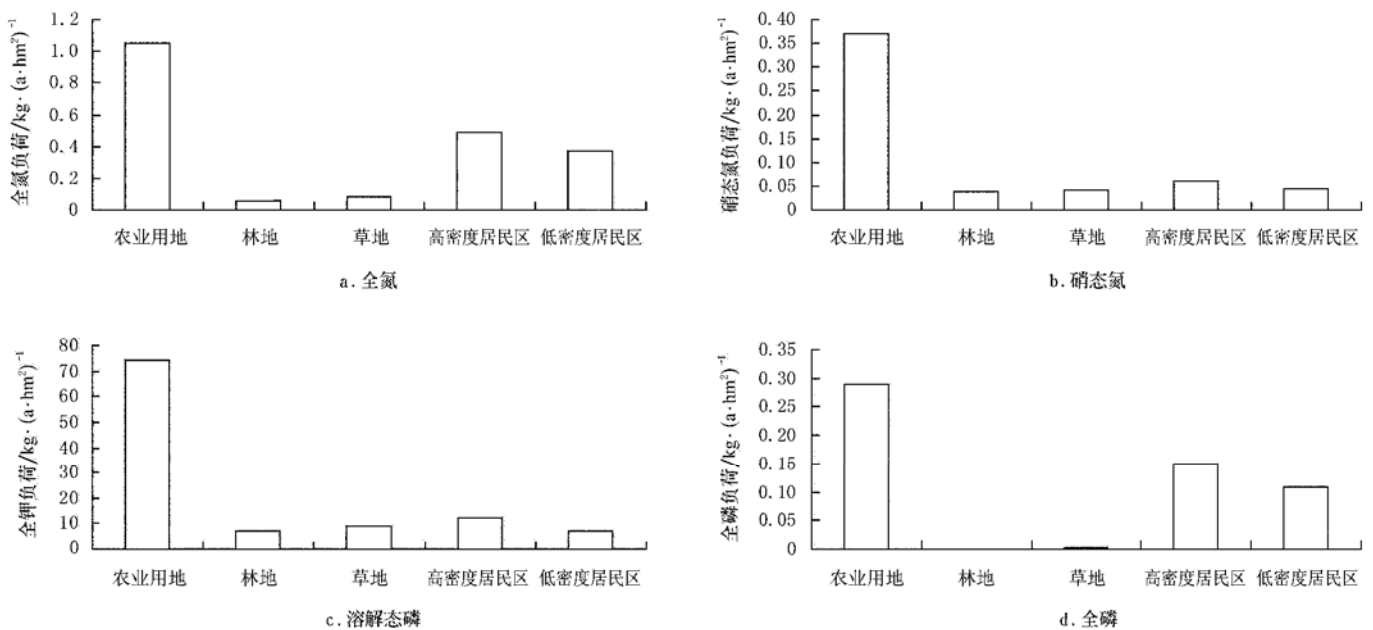
图5 6种污染物负荷空间分布图

Fig.5 Spatial distribution of six kinds of pollution load

3.2 不同土地利用类型非点源污染物输出负荷

根据模型模拟得到的不同土地利用类型上的污染物输出负荷的统计数据(图6)可以看出,研究区内全氮的负荷以农用地最多,其次为高密度居民区即城镇和低密度居民区即乡村,森林和草地最少。硝态氮的负荷以农用地最多,其余土地利用类型的输出大致相同。溶解态磷的输出负荷以农用地最多,居民地次之,森林和草地最少。全磷的输出负荷也是农用地最多。BOD和

COD以居民地输出最多,农用地次之。从总体来看,农用地对研究区内非点源污染的影响最大,居民区次之,林地和草地的贡献最小。因此,林地和草地对各种污染物截留的效果较好,而农用地和居民地是污染物输出的主要土地利用类型,所以在进行土地利用类型规划时要充分考虑到这一点。模型模拟的结果与前人研究成果^[10]一致。



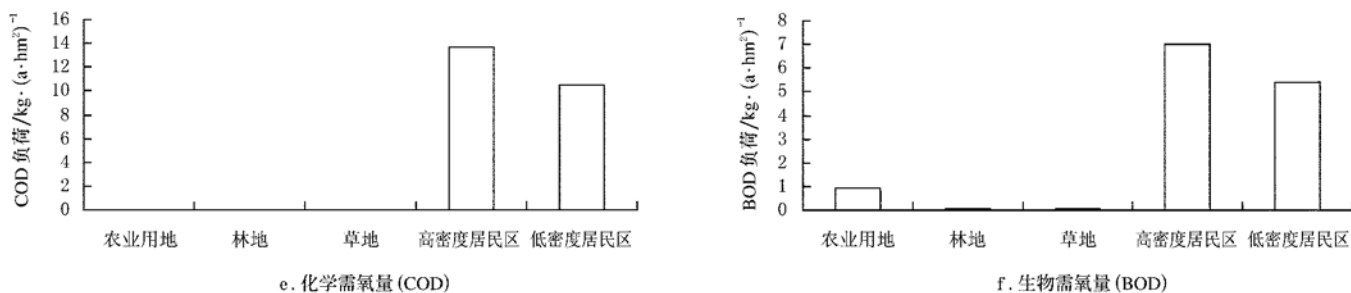


图6 不同土地利用类型下6种污染物输出负荷

Fig. 6 Six kinds of pollution loads under different land use types

L-T HIA 模型模拟的结果说明, L-T HIA 模型模拟区域内的非点源污染是有效的。这个模型具有输入数据简单的特性, 可以为很多监测数据不足的地区提供参考。而且, 因为这个模型提供的是多年平均污染效果, 可以用于区域内土地利用规划和决策服务。

在本研究中, 探讨了将传统的基于监测数据点上的非点源污染扩展为空间分布上的非点源污染信息的方法, 其结果的普适性还需要进一步在更多的区域验证。

4 结论与讨论

本研究利用 L-T HIA 模型, 估算了北京市密云水库周边地区 6 种非点源污染物的长期平均输出负荷, 分析了其空间分布特征。从计算结果可以看出: 全氮、硝态氮、溶解态磷和全磷 4 种非点源污染物输出负荷的空间分布较为一致, 输出量最大的地区分布范围与农田和城市的分布基本一致。COD 和 BOD 两种物质的空间分布较为一致, 输出量最大的地区分布范围与农田和城市的分布基本一致, 除此之外, 整体分布较为均一。

根据模型模拟得到的不同土地利用类型污染物输出负荷的统计数据, 研究区内全氮、硝态氮、溶解态磷和全磷的输出负荷以农用地最多, BOD 和 COD 以居民地输出最多。从总体来看, 农用地对研究区内非点源污染的影响最大, 居民区次之, 林地和草地的贡献最小。因此可以认为, 林地和草地是两种对各种污染物具有阻止流失作用的土地利用类型。

目前, 利用 L-T HIA 模型开展的工作见诸报道的不多, 本文的模拟的结果说明, L-T HIA 模型模拟区域内的非点源污染是有效的, 它可以用来模拟农业和城市地区长期平均的非点源污染状况。这个模型简单易用, 可以很好的为监测数据不足的地区提供服务, 模型模拟的结果可以用于区域内土地利用规划和决策服务。

[参 考 文 献]

- [1] 张大弟, 张晓红. 上海市郊区非点源污染综合调查评价[J]. 上海农业学报, 1997, 13(1): 31- 36.
- [2] 车 伍, 欧 岚. 北京城区雨水径流水质及其主要影响因素[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(1): 33- 37.
- [3] 刘 枫, 王华东, 刘培桐. 流域非点源污染的量化识别方法及其在于桥水库流域的应用[J]. 地理学报, 1988, (4): 329 - 339.
- [4] 刘 岩, 张天柱, 陈吉宁, 等. 滇池流域农业非点源污染治理的收费政策研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2003, 11(6): 787- 790.
- [5] 潘根兴, 焦少俊, 李恋卿, 等. 低施磷水平下不同施肥对太湖地区黄泥土磷迁移性的影响[J]. 环境科学, 2003, 3(3): 91- 95.
- [6] 阎伍玖, 鲍 祥. 巢湖流域农业活动与非点源污染的初步研究[J]. 水土保持学报, 2001, 12(4): 128- 132.
- [7] 王少平, 俞立中, 许世远, 等. 苏州河非点源污染负荷研究[J]. 环境科学研究, 2002, (6): 20- 23, 27.
- [8] 王晓燕, 郭芳, 蔡新广, 等. 密云水库潮白河流域非点源污染负荷[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(1): 31- 33.
- [9] 王晓燕, 王一岫, 王晓峰, 等. 密云水库小流域土地利用方式与氮磷流失规律[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1): 30- 33.
- [10] 王晓燕, 王晓峰, 汪清平, 等. 北京密云水库小流域非点源污染负荷估算[J]. 地理科学, 2004, 24(2): 227- 231.
- [11] 鲍全盛, 曹利军, 王华东. 密云水库非点源污染负荷评价研究[J]. 水资源保护, 1997, (1): 8- 11.
- [12] 苏保林, 王建平, 贾海峰, 等. 密云水库流域非点源污染识别[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(3): 360- 365.
- [13] 霍亚贞. 北京自然地理[M]. 北京: 北京师范学院出版社, 1989.
- [14] USDA (United States Department of Agriculture Soil Conservation Service). Urban hydrology for small watersheds[A]. In: Technical Release No. 55[C]. Colorado: Water Resources Publications, 1986: 15- 17.

- [15] 赵松岭. 集水农业引论[M]. 西安: 陕西科学出版社, 1996.
- [16] Harbor J. A practical method for estimating the impact of land use change on surface runoff, groundwater recharge and wetland hydrology [J]. Journal of the American Planning Association, 1994, 60(1): 95–108.
- [17] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 汉阳非点源污染控制区划[J]. 环境科学, 2006, 27(1): 31–36.

Spatial distribution characteristics of non-point pollution of Miyun reservoir areas based on L-THIA model

Shen Tao^{1,2}, Liu Liangyun², Ma Jinfeng^{1,2}, Li Cunjun¹, Wang Jihua^{2*}

(1. Research Center for Remote Sensing and Geographic Information System, College of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China)

Abstract: The output of agricultural nutritive substance is the one of main cause for water environment pollution. Taking Miyun reservoir in Beijing as study area, combined with the land use, soil and precipitation data, under the support of the GIS and RS technology, the long-term average pollution loads in study area were estimated using the Long-Term Hydrologic Impact Assessment(L-THIA) model. The spatial distribution of the pollution loads was analyzed. Results indicate that the pollution loads are different under different land use types, and the agricultural land has the most important impact on non-point pollution in the study area. The result of this research shows that L-THIA model is available for the spatial distribution of non-point pollution and it can provide the service for planning and management of the watershed.

Key words: L-THIA model; non-point pollution; land use