

城市化对水体非点源污染的影响

杨柳, 马克明*, 郭青海, 赵景柱

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要:非点源污染已成为世界上许多国家水体污染的重大污染源。长期以来, 农业非点源污染受到高度重视, 城市非点源污染的研究相对较少。而城市化是当今土地利用变化影响水质、流域的水文和其他物理特性以及发生潜在非点源污染的突出形式。城市化对水体非点源污染的影响, 主要体现在使非点源污染的“源”、“过程”和“汇”发生了变化。本文从描述-预测评价-应用的角度总结了国际上城市化对城市水体非点源污染影响的研究。目前主要侧重于用模型来描述城市化对城市非点源污染过程的影响, 模拟预测非点源污染物的负荷等。从景观生态学格局与过程的角度, 探讨城市化和城市非点源污染之间的关系。城市化带来的城市景观格局的时空变化对城市非点源污染的综合影响研究是今后发展的一个方向。

关键词:城市化; 城市非点源污染; 格局与过程; 土地利用变化

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2004)06-0032-08

Impacts of the Urbanization on Waters Non Point Source Pollution

YANG Liu, MA Ke-ming, Guo Qing-hai, ZHAO Jing-zhu

(Research Center for Eco-Environmental Sciences; Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Non-point source (NPS) pollution is the prominent source of water pollution in many countries, included America and China, of the world. Urban NPS pollution was attached little importance for long, compared with agriculture NPS pollution. While urbanization is the dominant form of land-use change in terms of impacts on water quality, the hydrology, other physical properties of watersheds as well as their NPS pollution potential at present. The formation of urban NPS pollution of water could be described by “source-process-sink”. Urbanization has changed the source, process and sink of urban NPS pollution. A review was conducted on the international researches of urbanization impacts on NPS pollution in urban water environment from the point of view of “describe-predict and evaluation-application”. The studies of urbanization impacts on urban NPS pollution were focused on modeling the process of urban NPS pollution by hydrologic model, predicting the pollutants load of NPS pollution. It is a fresh methodology that the relationship between urbanization and urban NPS pollution of water was analyzed by the method of landscape change and ecological process. The research on temporal-spatial comprehensive impacts of landscape pattern changes, led by urbanization, on the urban NPS pollution will be one of the hotspots.

Key words: urbanization; urban non-point source pollution; pattern and process; land-use change

土地利用变化不仅改变了自然景观的面貌, 而且影响了景观中的物质循环和能量分配, 它对区域气候、土壤、水量和水质的影响是极其深刻的^[1]。无论局地尺度、区域尺度乃至全球尺度上, 土地利用变化都是人类活动影响水文系统最为显著的表现形式。土地类型的变化, 极大地改变了地表的水文特征及水流的方向和速率^[2]。在城市化地区, 不断增加的非透水性地面和地下排水系统, 不仅加速了地表径流的形成, 增加其流量, 从而提高了洪水峰值, 而且也降低了受纳水体的水质, 引起了水供给问题的凸现^[3]。另外, 城市暴雨径流中含有诸如营养物、杀虫剂、病菌、石油、油脂、沉淀物以及重金属等许许多多的污染物, 已经成为水质破坏的主导原因^[4]。

目前, 我国约有 34% 的人口居住于城市, 而且随着城市化的快速发展, 城市面积仍在迅猛增加。明确土地利用时空变化对城市非点源污染的影响是至关重要的, 正确理解城市化这一景观格局变化和城

市非点源污染这一生态过程之间的关系, 对规划和管理城市非点源污染这一威胁城市健康持续发展的环境问题, 具有十分重要的意义。

1 非点源污染 城市化与城市非点源污染

非点源污染与点源污染相对应, 是指溶解的或固体的污染物从非特定的地点, 在降水和径流冲刷作用下, 通过径流过程而汇入受纳水体, 如河流、湖泊、水库、海湾等, 引起的水体污染^[5]。其污染物类型主要有盐分、重金属和有机物。非点源污染的成因有水土流失、城市膨胀、农药化肥过量使用、废弃物堆放等。土地利用方式的不合理是目前非点源污染恶化的关键所在^[6], 也就成为研究非点源污染控制

收稿日期: 2003-12-10; 修订日期: 2004-02-12

基金项目: 国家“十五”重大科技攻关项目(2002 AA601 022)

作者简介: 杨柳(1978~), 女, 博士研究生, 主要从事景观生态学研究。

* 通讯作者: mk_m@mail.rcees.ac.cn

与管理首当其冲的切入点。

城市化是个多层面的过程,目前尚未形成统一观点。一般而言,城市化又称都市化或城镇化,包括 2 个方面的含义:一方面是指变农村人口为城市人口、变农村地域为城市地域的过程,即城市化的数量过程;另一方面指城市文化、城市生活方式和价值观等城市文明在农村的地域扩散过程,即城市化的质量过程^[7]。在城市非点源污染的研究中侧重于城市化引起的景观格局变化,城市土地利用类型的时空变化是其直接的表现形式。

广义的城市非点源污染,按成因可分为城市地表径流污染、大气的干湿沉降、城市水土流失及河流底泥的二次污染;狭义的城市非点源污染即指城市地表径流污染,它是城市水体非点源污染最主要的类型。城市地表径流污染主要指在降雨过程中,雨水及所形成的径流流经城镇地面,如商业区、街道、停车场等,聚集一系列的污染物如原油、盐分、氮、磷、有毒物质及杂物,随之进入河流或湖泊,污染地表水或地下水体^[5]。美国环保署(US EPA)已把城市地表径流列为导致全美河流和湖泊污染的第三大污染源^[8]。我国城市化发展的同时,各城市均出现了不同程度的城市防洪排水能力不足、水资源供需矛盾尖锐及城市水环境遭受破坏等问题,它们反过来又制约着城市的发展。因此,为了城市的健康、持续发展,必须正确理解城市化和城市非点源污染之间的关系。

城市非点源污染形成过程的核心为“源-过程-汇”。城市化对水体非点源污染的影响,主要体现在使非点源污染的“源”、“过程”和“汇”发生了变化,不同学者对此进行了不同程度的探讨,其中,“汇”的变化主要通过“源”和“过程”的变化来体现。因此,相对于“源”和“过程”来说,针对城市化后非点源污染“汇”的变化研究,甚少见到。目前,国际上城市化对水体非点源污染的影响研究可归纳为:通过描述城市化和城市非点源污染之间的关系,得出了一定的规律;进而运用这些规律,对不同土地利用方式构成的景观空间格局对城市暴雨径流的影响,进行了模拟预测分析;最终将各种模型、RS 和 GIS 综合运用实际的评价、控制和管理之中。

2 城市化对非点源污染“源”的影响

2.1 污染物种类的变化

城市化前,土地利用类型以自然景观,如林地、草地、裸地等为主时,基本没有污染物的形成;随着

城市化的发展,土地利用类型以农业景观为主时,非点源污染的污染物主要为营养物质,如氮、磷等;而城市化地区,土地利用类型以城市景观,如高密度住宅区、低密度住宅区、工业区、商业区等为主时,非点源污染的污染物中除营养物质之外,出现了诸如大肠杆菌之类的病菌污染物^[9]、硝酸盐^[10]、以及铅、铜、锌等重金属^[11]。污染物种类发生变化的原因主要在于人类行为的改变。高密度/低密度住宅区对城市非点源污染中的有机污染物贡献度较高,病菌污染物来源于城市中动物和人的排泄物,工业区往往被认为是铅、铜、锌等重金属污染物的主要来源^[2, 12]。关于城市化前后污染物种类的变化,许多学者在研究中均有相关的论述^[9~16, 21]。

2.2 污染物数量/浓度的变化

污染物数量/浓度的变化在城市化前后表现得也相当明显^[9~15]。城市化地区,由于缺乏地表径流的缓冲区和自然过滤器,城市暴雨径流中含有高浓度的污染物,以重金属最为突出^[11]。Sartor & Boyd^[13]在研究中发现,城市暴雨径流中的固体悬浮物、营养物质、重金属等污染物的负荷/浓度要远高于未利用地和乡村径流中的污染物浓度。Sonzogni 等^[14]在研究中指出,美国众多学者均报道了城市化对城市暴雨径流的影响,农业用地和城市用地的地表径流中总固体悬浮物、总磷、总氮的浓度,是林地和未利用地中相应污染物的 10 到 100 倍。Corbett 等^[15]也利用 AGNPS (agricultural non point source runoff) 模型,对美国南卡罗莱纳州的森林流域 (forest watershed) 和城市流域 (urban watershed) 中非点源污染的径流,进行了比较研究,发现城市径流中的沉淀物量比森林径流中的沉淀物量多 12.65%。可以看出,城市化后污染物的数量/浓度迅速增加的数字触目惊心,全球范围内河流、湖泊水质的恶化已经引起了各国政府和众多学者的高度重视。Ren 等^[12]对上海 1947~1996 年间的城市化发展水平和水质情况分别进行了调查研究,研究结果显示上海地区城市化速度越快,水质退化越严重,城市土地利用面积与水质退化程度成正相关关系,随着城市用地面积的增加,城市水体的水质越差,并指出水质恶化中的 94% 与工业用地有关。Kelsey 等^[9]运用 GIS 和回归分析的方法,通过分析美国华盛顿哥伦比亚特区的默雷尔水湾 (Murrells Inlet), 1989~1998 年间 21 个监测点的土地利用数据和大肠杆菌的浓度变化,评价了土地利用方式和大肠杆菌污染物之间的关系,认为城市地表径流是流域中大肠杆菌浓度的重

要制约因素,城市化率(城市用地面积/非城市用地面积)越高,大肠杆菌的浓度越高。

3 城市化对非点源污染“过程”的影响

城市化对非点源污染“过程”的影响,主要体现在城市化对降雨-径流过程的影响,改变了区域的水文过程^[16]。城市化前后,降雨径流的峰值、径流形成的时间和流量等均发生了变化,从而改变了污染物的累积和冲刷规律。城市土地利用类型的变化,主要通过影响下垫面的通透性和地下排水系统,改变城市径流的速率、数量和方向。城市化前,土地利用方式基本以自然为主,几乎没有出现非透水性下垫面和地下排水管道;而随着城市用地面积的扩大,非透水性下垫面逐渐增加,降低了城市径流的渗透,增加了径流流量;而且,树木的减少、土壤的板结及地表的平整等也促进了城市径流流量的增加^[12];此外,大量地下排水管道系统的出现,加速了暴雨径流的形成,大大缩短了降雨径流进入受纳水体的时间,增加了河流、湖泊等水环境水质恶化的控制难度。

土地利用变化之所以能够对非点源污染产生影响的关键,就在于地表径流对所流经的下垫面性质反应的敏感性。据此,可将下垫面分为透水性下垫面和非透水性下垫面。一般而言,透水性下垫面(permeable / pervious surfaces)是指流经其上的径流能够下渗(infiltration)并截留部分径流的下垫面,如林地、草地、未利用地及农田等。非透水性下垫面(impermeable / impervious surfaces)可简单定义为流经其上的径流不能下渗的下垫面,包括各种行车道、人行横道、停车场及屋顶等水泥、沥青或其他不透水材料所覆盖的表面^[3]。

Rouge Project^[17]研究中指出,1964到1995年间,Upper Rough流域的年均洪峰流量增加了4倍,很好地说明了城市化对暴雨径流峰值的影响。此外,Corbett等^[15]的研究也表明,美国南卡罗莱纳州城市流域的年均径流量比森林流域年均径流量高出14.85%。在城市非点源污染过程的研究中,了解非透水性地面上污染物的累积特征,对于预测污染物的冲刷规律,及设计和制定减少水体非点源污染对环境负面影响的方法措施等,起着相当重要的作用^[18]。但目前,城市化对污染物累积和冲刷规律的影响,研究得较少。只有Vaze等^[18]对澳大利亚墨尔本市路面污染物的累积特征和冲刷规律,进行了36d的采样统计研究。统计数据显示,紧随暴雨之后的晴天中,污染物累积迅速;但几天过后,随着污染

物重新分布的开始,污染物累积的速度明显降低。并发现,普通暴雨只能冲刷路面污染物总量的一小部分。Vaze等的研究表明,学者们已经认识到研究非点源污染物累积和冲刷规律的必要性。遗憾的是,他们并没有进行城市化前后非点源污染物路面累积和冲刷规律的对比研究。非透水性下垫面是衡量土地利用变化对水环境系统产生负面影响的一个十分重要的指标^[19]。非透水性下垫面对恶化城市水体非点源污染的重要性,已经引起了不同学者的普遍重视,属于当今城市非点源污染研究的热点之一。Booth和Jackson^[20]在研究中发现,华盛顿西部等湿润地区,约占流域总面积10%的非透水性下垫面就能影响该生态系统的功能,有些生态系统功能的丧失是无法弥补的。许多研究表明^[21, 22],如果一个流域的非透水性下垫面的面积小于该流域总面积的10%,除盛产鲑鱼的小溪等高度敏感的小河道之外,该流域的水质没有明显的变化;如果一个流域的非透水性下垫面的面积占该流域总面积的11%~25%,该流域的径流过程就会发生明显的变化,能够对该流域的水质产生负面影响;如果一个流域的非透水性下垫面的面积大于该流域总面积的25%,那么该流域就会出现严重的水环境生态系统退化现象。可见,少量非透水性下垫面的增加就会引起水环境的水质退化问题。

4 城市非点源污染的预测与评价

如前所述,城市化对城市水环境非点源污染影响的研究只有应用到实际当中,能够为控制和治理水环境生态系统健康恶化问题,提供有效信息,才具有生命力。目前,有关城市非点源污染的预测和评价研究,主要集中在以下几个方面:

4.1 土地利用变化和水质间关系的预测

土地利用变化与水质间关系的预测评价研究,主要通过一种或几种污染物浓度的变化和土地利用变化参数进行相关分析,评价了不同土地利用方式与特定污染物之间的相关关系。Brezonik等^[23]利用多元回归模型(multiple linear regression models),通过建立10种污染物(6种氮磷污染物、TSS、VSS、COD和Pb)和不同土地利用类型之间的关系,对美国明尼苏达州的Twins市,进行了暴雨径流流量、污染物浓度等的分析和预测,认为Twins市的总降雨量、降雨强度及排水/汇水面积是多元回归模型预测该区域径流流量和非点源污染物负荷的重要参数。

4.2 洪水峰值、汇集时间以及径流流量的预测

运用土地利用变化和水环境非点源污染之间关系的规律,进行洪水峰值、汇集时间以及径流流量的预测。Campana 等^[24]采用 IPH IV^[25]水文模型和 GIS 预测了巴西 Porto Alegre 市的 Diluvio 流域在不同城市化阶段的水位曲线,模拟结果显示具有 50% 的非透水性下垫面的城市景观格局中,径流洪峰值,较城市化前要高出 20%~50%。随着非透水性下垫面的增加,缩短了地表径流的汇集时间,因此暴雨径流的流量和洪水峰值也随之增加。水文模型和 GIS 的结合,为研究非点源污染问题提供了输入、管理数据的便捷途径。但是,与 GIS 结合进行非点源的模拟预测研究时,GIS 只是作为数据输入输出和管理的工具,没有实现 GIS 和水文模型的真实耦合;而且,目前模拟、预测和评价研究的精确度还有待提高,此方面研究的效率和精确度没有达到最佳效果。因此,基于地理数据库(Geodatabase)的 GIS 与城市非点源污染模型的耦合,及在模型中引入模糊理论、不确定性分析,提高预测评价的精确度,形成城市非点源污染专家管理决策支持系统是今后的发展趋势。

4.3 城市水生态系统健康评价

通过评价流经不同土地利用类型下垫面的地表径流质量(污染程度),对城市这一生态系统的水质健康现状进行评价。Richard 等^[26]通过对墨西哥提华纳市的土地利用变化、径流流量以及非点源污染物浓度之间的相关分析,将城市水生态系统健康恶化的主导原因,归结为城市化引起的土地利用变化。其中隐含的假设为,研究区域的总面积及城市化前后污染物的排放总量恒定,这显然与实际不符。因此,只研究土地利用变化这个因素与径流流量、污染物浓度之间的相关关系,对理解城市化和水体非点源污染之间的关系缺乏全面性。在今后的研究中,应探讨如何增加假设的合理性,如何剔除假设本身对城市非点源污染的影响,并要增加除土地利用变化之外的城市化其它生态环境效应对水体非点源污染的综合影响。

4.4 城市非点源污染的潜在危险预测评价

以土地利用变化对城市非点源的长期水文影响为切入点进行了评价和预测。主要根据某一尺度的区域多年(一般要在 30a 以上)的土壤类型、土地利用变化和区域气候等流域特征数据,寻找土地利用变化、径流过程和水环境水质恶化(尤其是由非点源污染引起的)之间的关系,最终可以模拟现在和未来

不同土地利用方式之间的组合对区域水文特征(如非透水性面积等)的影响,进而预测该城市景观格局中城市非点源污染的潜在危险程度及其对河流、湖泊等水质的影响。Bhaduri^[27]和 Leitch^[28]分别利用 L-THIA(Long-Term Impact Assessment)模型对美国印第安纳州 LEC 流域和巴巴多斯岛 Hohetwn 流域进行了此类的预测评价研究。Bhaduri 利用 L-THIA 模型对 LEC 流域 1973~1991 年的土地利用变化进行长期水文影响评价研究时发现,18% 的城市/非透水性下垫面可以导致年均径流量增加近 80%,年均径流中的重金属(铅、铜、锌等)增加了 50%,而且因农业用地面积的减少,营养物污染物(氮磷等)降低了 15%。可见,城市/非透水性下垫面的面积与污染物浓度、年均径流量之间呈非线性关系。因此,土地利用变化的长期水文影响评价,能够为城市非点源污染管理措施、城市土地利用规划等的制定,提供一个定量的形象化技术支持。

4.5 非点源污染评价预测方法与 GIS 的结合

地理信息系统(GIS)作为一个集成环境,已经越来越多的应用于城市非点源污染的研究之中。非点源污染形成的水动力过程,以及污染物在水环境中的分布、迁移和转化,都具有明显的空间特性^[29],但是水文模型对空间数据的管理能力相对较弱,而 GIS 在空间数据管理、建立复杂空间模型,及空间数据的显示和查询方面,具有强大的优势。由于水文模型和 GIS 功能上存在互补性,因此近年来两者的结合,一直是环境研究中颇受重视的领域。AGNPS、SWAT、ANSWERS 等水文模型以 Arcview 为平台,与 GIS 进行了较为成功的结合^[30~32],但到目前为止,GIS 和水文模型的结合多限于低层次的文件交换^[33]。

5 预测评价模型

5.1 常用模型

降雨是城市非点源污染形成的动力因素,而降雨形成的径流是非点源污染物迁移的载体。因此描述城市化对城市水环境非点源污染的影响时,主要是用量化方法,即选用合适的模型,描述土地利用变化对径流的峰值、出现时间及径流流量的影响。目前通用的水文模拟模型主要有 SWMM(Storm Water Management Model)^[34]、BASINS(Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources)^[35]、SWAT(Soil and Water Assessment Tool)^[36]、HSPF(Hydrological Simulation Program

FORTRAN)^[37]和 L-THIA (Long Term Hydrologic Impact Assessment)^[27];其他模型还有 CREAMS (Chemical Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems)^[38]、GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems)^[39]、ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation)^[40]及 AGNPS (Agricultural Nonpoint Source)^[41]等.不同的模型基于的假设和数学公式不同,所需的输入数

表 1 非点源污染模型比较

Table 1 The comparison of different NPS pollution models

模型名称	适用规模	污染源	流域数量	模型的时间分辨率	污染物进入水体的方式	污染物类型
SWM	城市用地	点/面源	多个	min/s	径流/渗流/人工管道	易降解/难降解
SWAT	农业用地/未利用地	点/面源	多个	d/h	径流/渗流/人工管道	易降解/农药
BASINS	农业/城市/未利用地	点/面源	多个	d/h	径流	易降解/农药
HSPF	农业/城市/未利用地	点/面源	多个	min/s	径流	易降解/农药
CREAMS	农业用地/未利用地	面源	单个	min/s	径流	易降解/农药
GLEAMS	农业用地/未利用地	面源	单个	d/h	径流/渗流	易降解/农药
ANSWERS	农业用地/未利用地	面源	多个	min/s	径流/渗流	易降解
AGNPS	农业用地/未利用地	点/面源	多个	min/s	径流	易降解/难降解

5.2 L-THIA 模型

基于 SCS CN (Curve Number) 法^[44]发展而来的 L-THIA (Long Term Hydrologic Impacts Assessment of land use changes) 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.由美国农业部土壤保护局 (the United States Department of Agriculture Soil Conservation Service) 的经验数据建立起来的 CN 法,是基于土地利用和土壤属性数据的一种水文抽象方法,是降雨、土地利用参数与径流深之间的经验关系数据集,可以计算“多大强度的降雨可以产生径流”^[45].CN 值包括土壤类型、土地利用方式和其他地面特征等水文要素,用“土壤-植被-土地利用”来描述,不同强度降雨条件下,该土地利用能够调节的降雨潜在径流^[46].某一土地利用类型(不同土地利用类型的 CN 值不同)的径流深、降雨深之间的关系可以通过下列公式来表达^[45]:

$$R = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad P > 0.2S \quad (1)$$

$$S = \left\lfloor \frac{25400}{CN} \right\rfloor - 254 \quad (2)$$

其中, R 为径流深 (mm)、 P 为降雨深 (mm)、 S 为最大持水能力 (mm) (potential maximum retention)、 CN 为不同土地利用类型的 CN 值.得到径流深后,再与该区域的面积相乘就可以得到某次降雨能够产

生的径流量.研究中选用何种模型,首要的原则就是要根据模型的精确度、灵活性以及数据要求和使用的简易程度^[15]来选择.除 L-THIA 模型之外,其他模型在国内的一些研究^[6, 29, 42, 43]中,已经做过较为详细的论述(不同非点源模型比较见表 1),因此,这里只介绍土地利用变化的长期水文影响评价模型 L-THIA (Long Term Hydrologic Impact Assessment),在研究土地利用变化和城市非点源污染关系中的应用.

生的径流量.

与其他模型相比,在研究城市化、地表径流和城市非点源污染之间的关系方面,L-THIA 模型具有以下几个优势:L-THIA 模型能够很好的与 GIS 结合,便于模型输入、输出数据的生成和管理,便于形象化显示模型模拟的结果;L-THIA 模型所需的输入数据只有土壤类型、土地利用方式和气候数据,数据相对较少而简单,可以相对弥补目前研究中普遍存在的数据不足问题;L-THIA 模型能够有效地评价土地利用变化对地表径流的长期水文影响,而研究土地利用变化对径流的长期水文影响,较短期的、单一的暴雨事件对径流的水文影响来说,对城市非点源污染的研究更有意义.L-THIA 模型的组成和研究中的一般步骤见图 1.鉴于 L-THIA 模型在城市化对城市非点源污染的影响研究中的优势,一些学者已将该模型应用到研究中^[2, 28].

6 城市非点源污染的控制与管理

6.1 合理规划城市土地利用类型

国内外多年研究实践证明,合理规划城市土地利用类型是控制非点源污染的有效途径,结合土地利用规划,寻求非点源污染控制最佳管理措施 BMPs (Best Management Practices) 是一个亟待探索的领域^[47].目前,城市非点源污染的控制与管理策略可分为源控制、过程/径流控制和汇控制 3 种^[11].源控

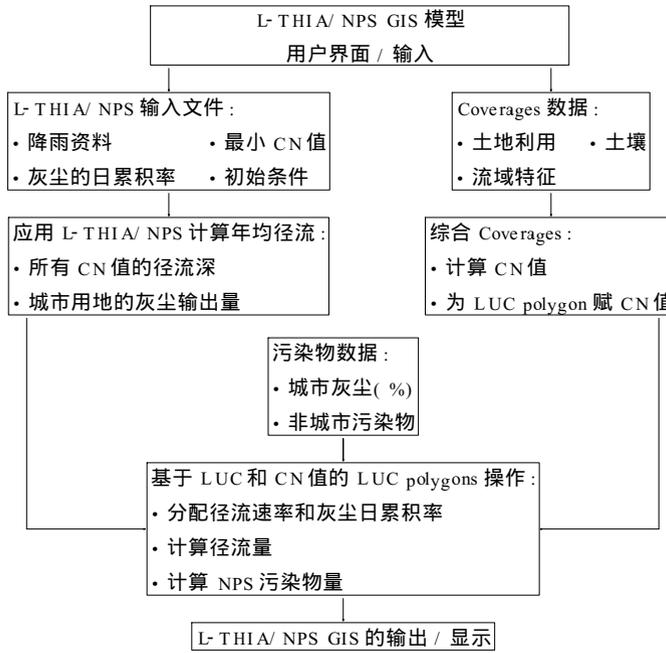


图 1 L-THIA 模型的组成和研究中的一般步骤 (Bhaduri, 2000)

Fig.1 The components of L-THIA model and the general process in research (Bhaduri, 2000)

制的主要目标是减少路面污染物的累积,减少污染物的数量及它们的运移.比如,减少汽车尾气的排放量,增强街道清扫次数,实施“抵制乱扔垃圾行为和自觉清理落叶”等公民活动等等.源控制是一种十分经济、有效的城市非点源污染控制管理措施,主要依靠提高公众的环境意识来完成.某种程度上,公民的环境意识是非点源污染能否有效控制的关键之一.过程/径流控制旨在减少非透水性下垫面的面积,降低径流流量和洪峰峰值.例如,修建多孔路面,改变建筑物屋顶雨水落水管的方向,使其流入草地等透水性下垫面,尽可能利用天然排水系统.还可修建具有滞留塘的停车场 (parking lot ponds)、滞洪区 (detention basins) 及雨污分流的排水系统等,不过这些工程措施的成本较高,推广程度不甚理想^[48].而设计长坡长、低坡度的地形条件以增加径流的流经时间,通过自然过滤带和截留带的设计,减少径流的流量和流速等景观生态学方法,相对成本较低.因此,景观生态学方法是今后非点源污染控制和管理的研究热点之一.汇控制的方式主要有 2 种,物理化学处理和生物处理.前者通常包括固液分离、氯气杀菌等,对去除总固体悬浮物十分有效;后者利用细菌和生物化学的方法去除有机污染物.此外,汇控制还包括一些生态学方法,如在冲沟、小溪附近栽培绿色缓冲区截留雨水;种植发达根系的植被来固定土壤颗粒,并通过植被防止水土流失等^[11].

6.2 土地利用变化的水文影响评价

土地利用变化的水文影响评价,不仅能够为恢复水资源生态系统健康提供有用信息,而且对于制定流域的生态发展计划和评价土地管理政策具有重要的提示作用.Engel 等^[48]建立了网络决策支持系统 DSS (Decision Support System),为小流域的土地利用规划提供了有效信息.该网络决策支持系统主要由模型系统、用户界面和数据系统构成,能够根据用户输入的流域信息,进行该流域的土地利用变化水文影响评价,提供非点源污染的治理措施,以及城市非点源污染 BMPs 的成本评估等,是当今城市非点源污染控制与管理的一个较好范例.但该 DSS 的精确度和有效性有待进一步增强.而且,现存的控制和管理城市非点源污染的措施,缺乏定量化描述其有效性的研究.没有定量化评价之前就实施非点源污染控制和管理措施,势必造成措施本身可能带来的环境退化等负面效应.因此,今后此方面的研究应加强规划和措施有效性的评价.

7 小结

剖析土地利用方式与污染负荷之间的内在联系是非点源污染研究的基本出发点^[47].城市化对水体非点源污染影响的研究,不同的学者分别从对城市非点源污染的“源”、“过程”、“汇”的角度对问题进行了描述.在此基础上,预测分析了不同土地利用方式

构成的景观格局,对城市非点源污染和城市暴雨径流的影响,并将各种模型与 GIS 相结合,进行实际评价、控制和管理的研究。目前相关的研究主要侧重于,用模型来描述城市化对城市非点源污染过程的影响,模拟预测非点源污染物的负荷等。从景观生态学格局与过程的角度,探讨城市化和城市非点源污染之间的关系,尚属新兴视角,有待进一步研究。而且,土地利用变化与城市非点源污染之间关系的研究中,侧重于土地利用的时间变化对非点源污染的影响,而忽略了土地利用的空间变化对城市非点源污染的影响。因此,城市化带来的城市景观格局的时空变化对城市非点源污染的综合影响研究是今后发展的一个方向。此外,城市化对水体非点源污染“汇”的影响,如大气干湿沉降形成的二次污染等,以及城市中不同功能区对城市非点源污染源、污染物的贡献等问题,尚未引起充分重视。

尽管城市化与水环境污染之间的关系错综复杂,但却较易理解。即相对较小的空间内,容纳了大量的人口,而其中的人类又不断的创造许多污染物,带来了污染问题,而且城市大多依水而建,因此水环境就成为倍受污染的受害者。土地利用方式、坡度和土壤属性等流域特征通过调节沉积物和化学物质的汇集影响水质。其中,只有土地利用方式是改善水质。研究非点源污染控制与管理的切入点^[20]。城市化对城市非点源污染影响的研究,在我国尚属空白,而且我国城市化发展过快,已经出现了环境退化等问题,因此要加强城市非点源污染的管理,加大宣传教育力度,提高公众环境意识。Olli Varis 等^[49]对中国目前水资源管理存在的问题进行了调查,结果显示中国北方的人均水资源占有量不足水资源极度匮乏的埃及人均水资源占有量的二分之一,并提出中国未来发展中必须面临的 8 个挑战。其中中国水资源的不均衡和匮乏、人口密度问题、城市化发展过快、环境退化等问题的解决,急需生态学和环境科学研究者的共同努力。

参考文献:

- [1] 郭旭东,陈利顶,傅伯杰. 土地利用/土地覆被变化对区域生态环境的影响[J]. 环境科学进展, 1999, 7(6): 66 ~ 75 .
- [2] Budhendra Bhaduri, Jon Harbor, Bernie Engel, Matt Grove. Assessing watershed scale, long-term hydrologic impacts of land use change using a GIS-NPS model[J]. Environmental Management, 2000, 26(6): 643 ~ 658 .
- [3] Schueler T R. The importance of imperviousness[J]. Watershed Protection Techniques, 1994, 1: 100 ~ 111 .
- [4] US EPA. Results of the national urban runoff program[R]. US EPA, Washington DC: 1983 .
- [5] 贺维生,傅伯杰,陈利顶. 非点源污染的管理及控制[J]. 环境科学, 1998, 19(5): 87 ~ 91 .
- [6] 郑一,王学军. 非点源污染研究的进展与展望[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 105 ~ 110 .
- [7] 仲小敏. 世纪之交中国城市化道路与对策构思[J]. 经济地理, 2000, 20(3): 54 ~ 57 .
- [8] US EPA. National water quality inventory. Report to Congress Executive Summary[R]. Washington DC: USEPA. 1995. 344 .
- [9] Kelsey H, Porter D E. Using geographic information systems and regression analysis to evaluate relationships between land use and fecal coliform bacterial pollution[J]. Journal of experimental marine biology and ecology, 2003, 3: 1 ~ 13 .
- [10] Prakash Basnyat, Teeter L D, Lockaby B G, Flynn K M. The use of remote sensing and GIS in watershed level analyses of non-point source pollution problems[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 128: 65 ~ 73 .
- [11] Alabama A M, Auburn universities. The urban environment and NPS pollution[J]. Alabama cooperative extension system, 1995, ANR-790-4.7.1 .
- [12] Wenwei Ren, Yang Zhong, John Melilgrana, Bruce Anderson, W Edgar Watt, Jiakuan Chen, Hok-lin Leung. Urbanization, land use, and water quality in Shanghai 1947 ~ 1996[J]. Environment International, 2003, 29: 649 ~ 659 .
- [13] Sartor J D, Boyd G B. Water pollution aspects of street surface contaminants[M]. Washington, DC: The United States Environmental Protection Agency, 1972. EPA-R2-72-081 .
- [14] Sonzogni W C, Chesters G, Coote D R, Jeffs D N, Konrad J C, Ostry R C, Robinson J V. Pollution from land runoff[J]. Environ Science Technology, 1980, 14(2): 148 ~ 153 .
- [15] Christopher W Corbett, Matthew Wahl, Dwayne E Porter, Don Edwards, Claudia Moise. Nonpoint source runoff modeling: A comparison of a forested watershed and an urban watershed on the South Carolina coast[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1997, 213: 133 ~ 149 .
- [16] Susanna T Y Tong, Wenli Chen. Modeling the relationship between land use and surface water quality[J]. Journal of environmental Management, 2002, 66: 377 ~ 393 .
- [17] Upper Subwatershed Advisory Group. Upper Subwatershed Management Plan. Detroit, Mich.: Wayne County National Wet Weather Demonstration Project. 2000 .
- [18] Vaze J, Francis H S Chiew. Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface[J]. Urban Water, 2002, 4: 379 ~ 389 .
- [19] Michigan Public Sector Consultants Inc. Michigan Land Use Leadership Council. 2002 .
- [20] Derek B Booth, C Rhett Jackson. Urbanization of aquatic systems — Degradation thresholds, stormwater detention and the limits of mitigation[J]. Journal of the American water resources association, 1997, 22(5): 1 ~ 19 .
- [21] U.S. Geological Survey (USGS), Department of the Interior.

- The effects of urbanization on water quality: Urban runoff[M]. Washington DC: USGS, 2001 .
- [22] University of Wisconsin. Stevens Point[J]. The land use tracker, 2002, Summer 2(1) : 1 .
- [23] Patrick L Brezonik, Teresa H Stadelmann. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA[J]. Water Research, 2002, 36: 1743 ~ 1757 .
- [24] Nestor A Campana, Carlos E M Tucci. Prediction floods from urban development scenarios: case study of the Diluvio Basin, Porto Alegre, Brazil[J]. Urban Water, 2001, 3: 113 ~ 124 .
- [25] Tucci, C E M, Braga B, Silveira A L L. Avaliacao do Impacto da urbanizacao nas cheias urbanas[J]. RBE Caderno de Recursos Hidricos, 1989, 7(1) : 86 ~ 94 .
- [26] Richard M Gersberg, Ghris Brown, Victor Zambrano, Karilyn Worthington, Daniel Weis. Quality of urban runoff in the Tijuana river watershed[J]. The U.S. Mexican Border Environment, 2001. 31 ~ 45 .
- [27] Bhadhuri B, Grove M, Lowry C, Harbor J. Assessing long-term hydrologic effects of land use change[J]. Journal of the American Water Works Association, 1997, 89(11) : 94 ~ 106 .
- [28] Christopher Leitch, Harbor J. Impacts of land use change on freshwater runoff into the near-coastal zone, Holetown Watershed, Barbados: Comparisons of long-term to single-storm effects[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1999, 3: 584 ~ 592 .
- [29] 李本纲, 陶澍, 曹军. 水环境模型与水环境模型库管理[J]. 水科学进展, 2002, 13(1) : 14 ~ 20 .
- [30] Jankowski P, Haddock G. Integrated nonpoint source pollution modeling system[A]. NCGIA Second International Conference/ Workshop on Integrating Geographic Information Systems and Environmental Modeling[C]. Brackenridge, Colorado USA: 1993, 26 ~ 30 .
- [31] Brian L, Sun H, Blodgett C, *et al.* An integrated interface system to couple the swat model and Arc/Info[A]. Third International NCGIA Conference/ Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling [C]. Santa Fe, New Mexico: 1996, 21 ~ 25 .
- [32] Engel B R, Srinivasan R, Arnold J, *et al.* Nonpoint Source (NPS) Pollution Modeling Using Models Integrated with Geographic Information Systems (GIS) [J]. Water Science and Technology, 1993, 28(3 ~ 5) : 685 ~ 690 .
- [33] 李本纲, 陶澍. 地理信息系统在环境模型研究中的应用[J]. 环境科学, 1998, 19(3) : 87 ~ 90 .
- [34] Huber W C, Dickinson R E. Storm water management model, version 4: User's manual. US Environmental Protection Agency, Athens, Georgia. Report No. 1988, EPA-600/3-88-001a : 569 .
- [35] US Environmental Protection Agency. Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources. Office of Water, 1998, EPA-823-B-98-006 .
- [36] Arnold J G, Williams J R, Srinivasan R, King K W, Griggs R H. SWAT-Soil and Water Assessment Tool-User Manual. Agricultural Research Service, Grassland, Soil and Water Research Lab, US Department of Agriculture. 1994 .
- [37] Johanson R C, Imhoff J C, Kittle J L Jr, Donigan A S. Hydrological Simulation Program FORTRAN (HSPF) : Users Manual for Release 8.0. Athens, GH: Environmental Research Laboratory, US Environmental Protection Agency. 1984 .
- [38] Knisel W G. CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems[R]. US Department of Agricultural Conservation Research Report, 1980 .
- [39] Leonard R A, Knisel W G, Still D A. GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1987, 30(5) : 1403 ~ 1428 .
- [40] Beasley K B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A model for watershed planning[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1980, 23(4) : 938 ~ 944 .
- [41] Young R A, Onstad C A, Bosch D, Andeerson W P. AGNPS: A non-point source pollution model for evaluating agricultural watersheds[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44(2) : 168 ~ 173 .
- [42] 薛金凤, 夏军, 马彦涛. 非点源污染预测模型研究进展[J]. 水科学进展, 2002, 13(5) : 649 ~ 656 .
- [43] 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, 1999, 7(5) : 60 ~ 67 .
- [44] USDA (United States Department of Agriculture Soil Conservation Service). Urban hydrology for small watersheds. Technical Release No.55. 1986. Water Resources Publications: Colorado.
- [45] 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 .
- [46] Singh V P. Elementary Hydrology. Prentice Hall, Inc: New Jersey. 1992 .
- [47] 鲍全盛, 王华东. 我国水环境非点源污染研究与展望[J]. 地理科学, 1996, 16(1) : 66 ~ 71 .
- [48] Bernard A Engel, Jin-Yong Choi, Jon Harbor, Shilpa M Pandey. Web-based DSS for hydrologic impact evaluation of small watershed land use changed[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2003, 39: 241 ~ 249 .
- [49] Olli Varis, Pertti Vakkilainen. China's 8 challenges to water resources management in the first quarter of 21st Century[J]. Geomorphology, 2001, 41: 93 ~ 104 .