

基于土地利用变化的烟台市非点源污染差异性分析

杨婧^{1,2}, 吴晓青¹, 马金卫^{1,2}, 崔秀平³, 郭玲玲³

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 鲁东大学 地理与规划学院, 山东 烟台 264025;

3. 烟台大学 环境与材料工程学院, 山东 烟台 264003)

摘要: 海岸带陆源非点源污染是导致入海河流污染和近海富营养化的重要因素之一。本研究应用长期水文影响评价模型(L-THIA), 结合 GIS 空间分析技术, 定量化模拟和分析了 20 年来烟台市区土地利用变化导致的年均地表径流量和非点源污染物(TN、TP)负荷变化的时空差异性。结果表明:耕地的流失使得研究区非点源污染总负荷下降, 耕地向建设用地的转换带来的不透水面扩大是引起近岸带产流增加以及非点源污染负荷高于远岸带的重要原因;研究区水文效应明显区和非点源负荷变化区与城镇扩展格局具有较好的一致性。

关键词: 土地利用变化; 非点源污染; L-THIA 模型; 海岸带; 烟台

中图分类号:X52

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2012)02-0054-05

Analysis of deviation feature of non-point source pollution in Yantai City based on the land use change

YANG Jing^{1,2}, WU Xiaoqing¹, MA Jinwei^{1,2}, CUI Xiuping³, GUO Lingling³

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Science, Yantai 264003, China;

2. School of Geography and Planning, Ludong University, Yantai 264025, China;

3. School of Environment and Materials Engineering, Yantai University, Yantai 264003, China)

Abstract: Non-point source pollution (NSP) from the inland is one of the main factors causing the river pollution and marine eutrophication in coastal zone. By using the long term hydrological impact assessment model(L-THIA), combining the GIS spatial analysis technology and quantitative simulation, the paper analyzed the spatial-temporal distributing characteristics of yearly surface runoff and NSP load caused by land use change. The results indicate that the great losses of agricultural land have resulted in a decrease of total NSP load. The rapid urban growth causing imperious area expansion is the main reason for the higher output runoff and pollution loads in near coastal zone. The variation of the direct runoff and NSP loads is closely related with the pattern of urban growth and land use changes.

Key words: land use change; NSP; L-THIA model; coastal zone; Yantai

1 概述

近年来,我国沿海城市工业、生活污水等点源污染得到了有效控制,但是近岸海域水环境质量却依然没有明显改善,局部海域甚至还呈现恶化趋势,赤潮现象时有发生。其中,一个重要的原因就是陆源非点源污染未得到高度重视和有效控制。众所周知,陆源非点源污染与土地利用方式有关^[1-3]。不同的土地利用方式一定程度上代表着不同的陆源产出,海岸带土地利用方式的变化会引起陆源物质成分及数量上的改变^[4]。因此,基于土地利用变化视角,研究海岸

带人类活动对地区地表径流量和陆源非点源污染的影响,对于海岸带土地利用规划管理、近岸海域污染控制和水资源保护具有重要指导意义。

目前,国内学术界对于内陆流域农业和城市非点源污染关注较多,对海岸带陆源非点源污染研究的较少^[5-6],已有的研究主要是通过监测入海径流来实现对海岸带陆源氮磷污染负荷的估算,基于海岸带土地利用方式角度,进行大中尺度空间模拟和调查研究的则不多^[7]。烟台是全国首批 14 个沿海对外开放城市之一,在国家政策支持下,近年来经济加速发展,城镇化规模不断扩大,地表不透水面及城

收稿日期:2011-11-06; 修回日期:2011-12-11

基金项目:国家自然科学基金项目资助(30800149)

作者简介:杨婧(1991-),女,山东胶南人,本科生,从事海岸带土地利用变化及其水环境效应研究。

通讯作者:吴晓青(1978-),女,山东肥城人,副研究员,从事海岸带城市化及其生态环境效应研究。

镇生活污水、畜禽养殖废水等污染源也随之大大增加,从而导致入海陆源污染物迅速增加,带来水源地面源污染加重、近岸海域赤潮频发等一系列生态环境问题。本研究基于土地利用变化视角,采用模型模拟和 GIS 空间分析相结合的方法,直观化、定量化模拟和分析烟台市过去 20a 来的土地利用变化过程导致的地区地表径流量和非点源污染负荷变化的时空差异性,以期为烟台市土地利用规划、陆源非点源污染防治提供科学支持。

2 研究区及研究方法

2.1 研究区概况

烟台市地处山东半岛中部,位于北纬 37°04′~37°38′,东经 121°15′~121°56′之间,总面积 2 643.60 km²,属北暖温带季风型大陆性气候,年均气温为 11.8℃,无霜期为 200 多天,多年平均降水量为 668.1 mm,降水年际变化较大,主要集中于 5

~9 月,占年降水量的 80%左右。研究区濒临黄海,地貌以丘陵和滨海平原为主,海岸线曲折,岬湾相间,并有大沽夹河、辛安河、沁水河等河流入海。地带性土壤为棕壤和褐土,植被区系属于暖温带落叶阔叶林区域,植被组成以赤松林、落叶栎林为主。

2.2 研究方法

模型模拟是研究非点源污染的重要手段。因缺乏长期非点源污染监测资料,难以应用国外的一些大型分布式机理模型,本研究采用基于 Arcview GIS 平台的长期水文影响评价模型(Long – Term Hydrologic Impacts Assessment model, L – THIA)^[8-9],模拟烟台市区土地利用变化对地表径流量及非点源污染物(总氮、总磷)负荷变化的长期影响,模拟流程见图 2,土壤水文分组见图 3。该模型输入数据主要包括土地利用类型、长期逐日降水序列和土壤资料,数据获取容易,能够快速分析区域土地利用规划方案所产生的水文水环境效应,有较强的实用性和准确性。

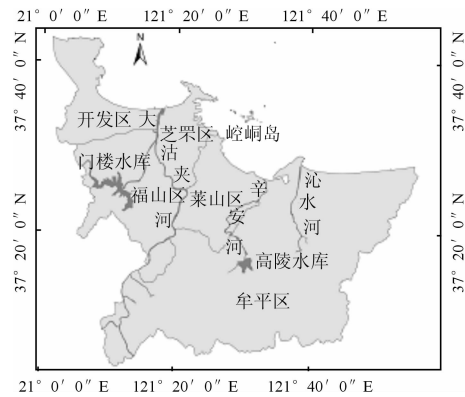


图 1 研究区地理位置

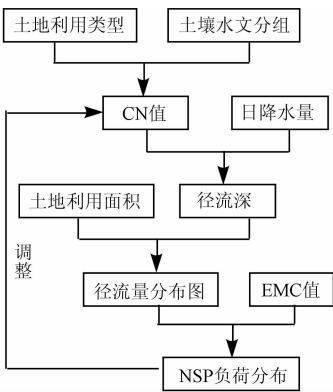


图 2 基于 L – THIA 模型的非点源污染模拟流程

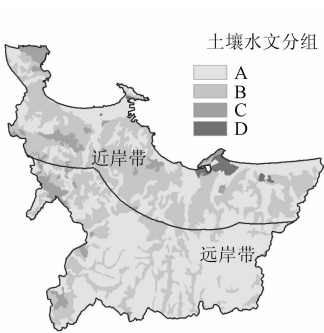


图 3 土壤水文分组空间分布

L – THIA 模型的核心是径流曲线方法(SCS – CN)即通过定量的 CN 指标来反映下垫面条件对产汇流的影响^[10]。SCS – CN 法假设集水区的实际入渗量与实际径流量的比值等于集水区该场降雨前的最大可能入渗量与最大可能径流量之比,建立起降水 – 径流关系:

Q = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) P ≥ 0.2S (1)

式中:Q 为实际径流量,mm; P 为降水量,mm; S 为次降水最大可能入渗量,mm。

S = 254 * (1000 / CN - 1) (2)

式中:CN 值是土地利用类型、土壤状况和土壤前期湿润程度(Antecedent moisture condition, AMC)的函数。在实际研究中,CN 值在 30 ~ 98 之间变化,本研究根据研究区 AMC 状况对 CN 值进行了修正。

L – THIA 模型模拟输出结果为像元尺度上的非点源污染负荷值和径流量。为深入分析土地利用变化及其导致的水文水环境效应,采用 ArcGIS 空间分析方法对模拟结果进行分带统计和网格分区统计。分带划分是将海岸线向陆 15 km 范围内划为近岸带,其余范围为远岸带,两者面积基本相当(图 3)。网格划分是利用 3 km × 3 km 的单元网格对总氮(TN)、总磷(TP)模拟结果进行负荷总量统计,并进行空间叠加运算,以识别非点源污染变化的高风险区。

2.3 数据获取与处理

土地利用数据源于 LandSat TM 影像,参照烟台土地利用调查图目视解译获得,时相为 1990、2000 和 2009 年,时间跨度为 20a。土地利用类型分为城镇、耕地、果园、林地、草地、水域、其他建设用地和其他用地等 8 类。土壤数据是通过数字化研究区 1:25

万土壤普查图得到,并根据美国土壤保持局的水文土壤分组的要求,参照烟台市有关土壤种粒度及质地参数,将其土壤水文特性归为 A、B、C、D 四类^[11],生成土壤水文图(图 3)。降水数据采用烟台福山气象站 1990-2009 年连续 20a 的日降水量资料,并处理成为模型所要求的文本格式。通过查阅大量国内外文献^[12-13],选取与研究区在气候、水文、土壤和农业耕作方式等方面具有很大相似性的地区的实测研究成果^[13]作为不同土地利用方式的非点源污染物产出系数,替换 L-THIA 模型内置的 TN、TP 事件平均浓度(Event Mean Concentration, EMC)值(表 1),来估算土地利用变化导致的非点源污染负荷的差异性以提高模型对陆源氮磷污染负荷的模拟精度。基于烟台市区 1:5 万数字高程模型(DEM),采用 Arc Hyro 工具划分研究区小流域及汇水单元,用于小流域径流量模拟结果的验证。

表 1 不同土地利用方式 TN、TP 的 EMC 值 mg/L							
耕地	果园	林地	草地	城镇	其他建设用地	其他用地	
TN	3.83	3.25	1.25	1.65	1.79	1.6	0.35
TP	0.305	0.25	0.048	0.101	0.12	0.12	0.023

2.4 径流量验证

输入研究区 2000 年的土地利用数据运行 L-THIA 模型,模拟得到地区年均地表径流量,并将其与区域及小流域的实际多年平均径流量进行比较(表 2)。结果显示,牟平区、沁水河流域以及辛安河流域的径流量模拟误差均控制在 8% 以内,模拟结果比较理想,符合模型应用的要求。整个研究区径流误差偏高,达到 27.5%,主要原因是 L-THIA 模型忽略了冰雪融水、地下水补给等一系列因素对产流的影响,且对区域地表径流有重大影响的大沽夹河流域在本研究区内不完整,上游径流量补给未考虑在内。总体看来,径流误差仍控制在误差允许范围之内,可以用来分析评价土地利用变化导致的长期地表径流量变化。在本研究中,因 TN、TP 的监测

数据不全,且研究目的重在通过 L-THIA 模型模拟土地利用变化导致的非点源污染时空变化的差异性,故不对其进行非点源污染负荷量验证。

表 2 径流量模拟值和多年平均值的比较 万 m ³ , %			
研究区域	模拟径流量	多年平均径流量	模拟误差
牟平区	37430	38830	3.60
沁水河流域	3504	3591	2.40
辛安河流域	9148	9940	7.96

3 结果与分析

3.1 土地利用变化特征分析

研究区主要土地利用类型为耕地和林地,在 1990、2000、2009 年 3 个时段,两类用地总面积均占到研究区的 65% 以上。随着城镇化进程的推进,研究区土地利用结构发生明显变化,主要表现为耕地大幅度减少,城镇等建设用地快速扩张。其中,20 年间耕地共减少 206.46 km²,城镇和其他建设用地增加 189.51 km²,由占区域总面积比重的 7.5% 提高到 14.2%。耕地向城镇和其他建设用地的转换是区域土地利用变化的主要趋势,合计占 2000-2009 年间土地利用总变化量的 50% 以上,是耕地同期损失量的 77%。其他用地类型中,果园和林地面积增加,草地和其他用地的面积减少,总体上变化幅度不大。分带统计结果显示(表 3),近岸带和远岸带土地利用结构与土地利用变化强度有所不同。近岸带的城镇面积占全区城镇用地的 95% 以上,且 20 a 来增长了 134.97 km²,占全区城镇扩张面积的 87.93%;同期的耕地损失面积占全区的 71.34%。可见,研究区耕地的减少和城镇等建设用地的增加主要源于近岸带用地类型变化的贡献。

3.2 土地利用变化对径流量的影响

模拟结果显示,1990、2000、2009 年全区年均径流总量分别为 7.35 亿、7.28 亿和 7.46 亿 m³,年均径流深分别为 27.81、27.67、28.36 cm,均呈现先小

表 3 1990 年、2000 年和 2009 年土地利用变化情况 km ²								
区域	年份	耕地	果园	林地	草地	城镇	其他建设用地	其他用地
近岸带	1990-2000	-65.49	20.17	1.17	-3.79	43.62	9.68	-3.10
	2000-2009	-81.80	-7.05	-3.05	-13.74	91.35	21.99	-4.63
远岸带	1990-2000	-37.10	17.50	12.43	-14.61	0.80	7.68	1.61
	2000-2009	-22.08	12.84	9.15	-16.88	1.27	13.11	0.82
研究区	1990-2000	-102.59	37.67	13.61	-18.40	44.42	17.36	-1.49
	2000-2009	-103.87	5.80	6.10	-30.62	92.62	35.11	-3.81

幅减少后增加的趋势。总体上来看,耕地面积减少、城镇等建设用地的增加是导致地区产流量增加的主要原因。但是,在 1990 - 2000 年间,因建设用地扩展速度相对较慢,耕地向果园、林地转换的面积比例较大,导致总径流量略微降低,这也与该年份降水偏少的事实相一致。分带来看,近岸带年平均径流量

大于远岸带,且呈现增加的趋势,而远岸带径流量逐渐减少,这主要是由于近岸带城镇和其他建设用地等用地类型的扩张增加了地表产流量,而远岸带建设用地面积所占比例低,果园、林地和水域面积有所增加,草地又较大面积减少,导致总径流量降低。

表 4 年均径流量和非点源污染负荷模拟结果统计

亿 m³, t

区域	径流量			总氮负荷			总磷负荷		
	1990	2000	2009	1990	2000	2009	1990	2000	2009
近岸带	4.44	4.45	4.68	1320.78	1273.83	1242.72	105.18	97.62	93.92
远岸带	2.91	2.82	2.78	972.29	926.91	902.72	78.16	71.74	69.78
研究区	7.35	7.28	7.46	2293.08	2200.74	2145.43	183.35	169.35	163.69

不同土地利用类型的年均径流量变化趋势与其面积变化特征紧密相关,见图 4。建设用地和果园的年均径流量增加,耕地、草地和其他用地的年均径流量则减少。1990 - 2009 年间,城镇等建设用地的扩张使得地表径流量增加了 1.03 亿 m³,其中,2000 - 2009 年间增长了 0.69 亿 m³,是 1990 - 2000 年的 2 倍。耕地为研究区面积比重最大的土地利用类型,20 年间耕地的流失使得地表径流量降低了 0.88 亿 m³,但小于建设用地产出的径流量,从而使得研究区 2009 年总径流量较 1990 年有所增加。

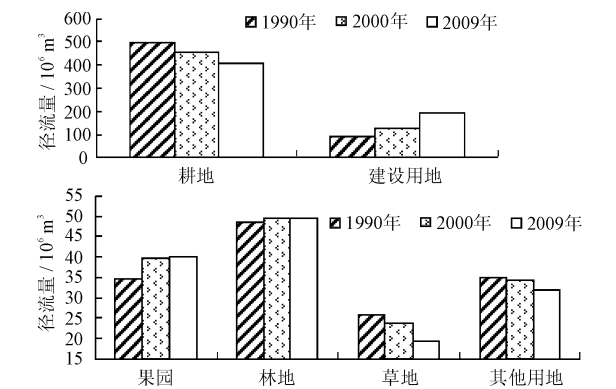


图 4 1990 - 2009 年间不同土地利用方式下的径流量变化 (建设用地为城镇和其他建设用地的归并)

网格空间分析结果显示,在近岸带的城镇用地分布集中区径流量都比较大,在牟平沿海东北部一带和昆嵛山、丘陵地带的林地区域径流量比较小。1990 - 2009 年间,径流量明显增加的区域与城镇建设用地的空间分布和扩展格局一致。

3.3 土地利用变化对非点源污染的影响

模拟结果显示,1990 - 2009 年间,研究区的 TN、TP 负荷量呈下降的趋势,3 个时间段 TN 负荷量分别为 2293.08、2200.74 和 2145.43 t,TP 负荷量分

别为 177.40、169.35 和 163.69 t(表 4)。近岸带与远岸带的 TN、TP 负荷变化趋势与全区一致,但是,由于近岸带林地覆盖面积少,城镇和其他建设用地的面积大,导致近岸带的总负荷高于远岸带。

过去 20 年间,耕地的 TN、TP 负荷分别下降了 336.17、26.77 t,城镇等建设用地相应地增加了 181.94、12.42 t;其他土地利用类型由于其 EMC 值较小或占地面积较小,非点源污染负荷变化较小。耕地是研究区非点源污染的主要来源,耕地面积的逐年减少导致全区非点源污染物总负荷量降低。但是,2000 - 2009 年间,城镇和其他建设用地的快速扩张,使得研究区总负荷减少的趋势放缓。

表 5 不同土地利用条件下 TN、TP 负荷变化 t

研究区域	耕地	果园	林地	草地	城镇	其他建 设用地	其他 用地
TN	1990 - 2000	-166.40	17.12	1.17	-3.33	49.22	10.17
	2000 - 2009	-169.77	0.31	-0.05	-7.49	104.85	17.69
TP	1990 - 2000	-13.25	1.32	0.04	-0.20	3.30	0.76
	2000 - 2009	-13.52	0.02	0.00	-0.46	7.03	1.33

在输出系数给定的情况下,非点源污染负荷空间分布与土地利用格局相一致。耕地、果园的集中区也就是非点源污染输出高负荷区,主要分布在开发区与福山区、莱山区与牟平区以及牟平与威海市交界区域。低负荷区集中在地形比较高的昆嵛山等丘陵地和沿海防护林一带。网格叠加分析发现,尽管区域负荷总量是减少的,但是两个时间段非点源输出负荷变化具有空间差异性,存在着非点源负荷明显增加的区域。其中,1990 - 2000 年间,TN、TP 负荷增加区集中在近岸带的黄务、芝罘湾港区和经济技术开发区的大沽夹河西岸;2000 - 2009 年间,负荷增长区域分布在近岸带已高度城镇化的芝罘区

和养马岛前怀海域。非点源输出负荷明显减少的区域与城镇扩展格局相一致,往往处在城镇空间扩展的前沿,主要源于该时段内耕地的大量流失。

3.4 非点源污染分区控制与管理对策

基于分带和分网格统计分析的结果,将烟台市区分为城镇化区、城镇化扩展前沿区和其他区域等三类区域,有针对性地开展非点源污染分区控制与管理。城镇化区即城市中心区和沿海岸线建设用地集中分布区,需要加强城市环境管理,提高城市清扫次数,完善雨水处理设施,增加下凹绿地,改善地面铺装方式,控制通过地表径流方式入海造成近岸海域污染。城镇化扩展前沿区即处在城镇空间扩展前沿且耕地比重较高的区域,尽管短期内非点源污染物总负荷量是减少的,但是潜在的非点源污染风险较高,需要在城市规划建设初期和过程中,做好城市绿地建设和污水管网规划,优化城市土地利用格局,减少潜在不利影响。其他区域即目前非点源污染负荷总量变化不太明显的区域,需要针对不同区块的土地利用结构,采取因地制宜的对策,进一步优化土地利用格局,做好耕地、果园等农业用地的耕作管理,进行必要的生态工程建设,控制非点源污染物的产生及转移。

4 结 语

(1)本研究将 L-THIA 模型与 GIS 空间分析方法相结合,直观地、定量化模拟和分析了烟台市区 1990-2009 年间地表径流量和非点源污染负荷变化的时空差异性。结果显示,1990-2009 年间,城镇等建设用地的扩张使得地表径流量增加了 1.03 亿 m^3 ,而耕地的流失使得地表径流量降低了 0.88 亿 m^3 。

(2)耕地是研究区 TN、TP 输出负荷的主要来源,耕地向建设用地的大面积转换导致研究区非点源污染总负荷降低。但是,在 2000-2009 年间,城镇建设用地的加速扩展使得全区 TN 和 TP 负荷减少的趋势明显放缓。

(3)在空间变化格局上,年均径流量增加的网格区和 TN、TP 负荷明显减少的网格区与城镇扩展格局具有较好的一致性。耕地向建设用地的转化带来的不透水面扩大是引起近岸带产流增加的直接原因,也是其非点源污染负荷高于远岸带的重要原因,这些结果可为研究区非点源污染分区控制与管理提供指导。

(4)L-THIA 模型能够快速分析土地利用变化所带来的非点源负荷的变化并进行实现可视化表达,适合于大尺度区域不同土地利用规划方案的水环境影响快速评估。未来的研究将考虑结合土地利用变化模型和情景分析方法,模拟和评估不同管理方案下土地利用变化导致的非点源污染潜在风险,为海岸带城市发展和近岸海域生态环境保护提供决策依据。

参考文献:

- [1] 沈涛,刘良云,马金峰,等.基于 L-THIA 模型的密云水库地区非点源污染空间分布特征[J].农业工程学报,2007,23(5):62-68.
- [2] 郎海鸥,王文杰,王维,等.基于土地利用变化的小江流域非点源污染特征[J].环境科学研究,2010,23(9):1158-1166.
- [3] 金洋,李恒鹏,李金莲.太湖流域土地利用变化对非点源污染负荷量的影响[J].农业环境科学学报,2007,26(4):1214-1218.
- [4] 李英,王中根,彭少麟,等.土地利用方式对珠江河口生态环境的影响分析[J].地理科学进展,2008,27(3):55-59.
- [5] 欧维新,高建华,杨桂山.苏北盐城海岸带陆源氮磷污染负荷估算初探[J].生态环境,2006,23(3):495-498.
- [6] 陈克亮,朱晓东,王金坑,等.厦门市海岸带水污染负荷估算及预测[J].应用生态学报,2007,18(9):2091-2096.
- [7] 刘星才,许有鹏,李嘉俊,等.东南沿海中小流域非点源污染估算研究与分析[J].水土保持通报,2007,27(5):41-44.
- [8] Bernard E. Long term hydrologic impacts assessment and non-point source pollutant model. Version-2. 3 Manual, 2003:1-7. [EB/OL]. [2009-06-16] <http://www.ecn.purdue.edu/runoff>.
- [9] Choi W. Estimating land-use change impacts on direct runoff and non-point source pollutant loads in the Richland Creek basin (Illinois, USA) by applying the L-THIA model. [J]. Journal of Spatial Hydrology, 2007,7(1):47-65.
- [10] 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.
- [11] USDA (United States Department of Agriculture Soil Conservation Service). Urban hydrology for small watersheds. In: Technical Release No. 55 [M]. Colorado: Water Resources Publications, 1986. 15-17.
- [12] 应兰兰,侯西勇,路晓,等.我国非点源污染研究中输出系数问题[J].水资源与水工程学报,2010,21(6):90-95.
- [13] 张棋.浏阳河土地利用变化对非点源污染负荷的影响[J].环境工程学报,2009,3(2):377-380.