

· 环境综合整治 ·

基于改进输出系数模型的非点源污染负荷估算

——以嫩江流域为例

段 扬¹, 蒋洪强¹, 吴文俊¹, 周元春²

(1. 生态环境部环境规划院生态环境规划与政策模拟技术中心, 北京 100012;
2. 南京大学环境学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏 南京 210023)

摘要: 文章以嫩江流域为研究对象, 应用改进输出系数模型对研究区 2006~2010 年非点源 TN 与 TP 负荷进行了估算与空间模拟。结果表明 2010 年 TN 与 TP 入河量较 2006 年减小 26.30% 和 18.04%。不同污染物来源中, 对于 TN 和 TP 的贡献率排序为土地利用>畜禽养殖>农村生活污水。土地利用变化对于 TN 和 TP 的输出也产生巨大的影响, 在 2006~2010 年间有 30.47% 的土地发生变化, 其中林地转变为草地面积最大; 非点源 TN 和 TP 产生量总计分别减小了 7 979.51 和 3 172.08 t, 其中水域减小量最大, 而草地产生量则增加最多; 根据土地利用类型 TN 与 TP 转变过程量得出水域转变为草地这一过程对于氮磷的削减量最大, 而林地转变为水域这一过程对于氮磷的增加量最大。

关键词: 输出系数法; 土地利用; 非点源污染; 嫩江流域

中图分类号: X522

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2020.04.008

Estimation of Non-Point Source Pollution Load Based on Improved Export Coefficient Model ——A Case Study of Nenjiang Watershed

DUAN Yang¹, JIANG Hongqiang¹, WU Wenjun¹, ZHOU Yuanchun²

(1. State Key Laboratory of Environmental Planning and Policy Simulation, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: A case study of Nenjiang Watershed was carried out in this paper. The improved export coefficient model was used to estimate and simulate the non-point source pollution load of total Nitrogen (TN) and total Phosphorus (TP) from 2006 to 2010. The results showed that the TN and TP in 2010 were 26.30% and 18.04% smaller than those in 2006. As for the pollutant sources, the land use contributed the most TN and TP pollution load, followed by the livestock and poultry breeding and the wastewater from rural areas. The use variation of the land also strongly impacted on the production of the TN and TP. 30.47% land had changed from 2006 to 2010. There was the most area changed from the forest to the grassland. The total production of the non-point source TN and TP were reduced by 7975.51 and 3172.08 tons, respectively. The water area was reduced with the most amount, while the grassland was most produced. According to the change of TN and TP with the different types of the land uses, the land change process from the water area to the grassland contributed the most reduction of the TN and TP. The land change process from the forest to the water area contributed the most increase of them.

Keywords: Export Coefficient Model; Land Use; Non-point Source Pollution; Nenjiang Watershed

CLC number: X522

非点源污染目前已成为世界范围内导致水体恶化的主要原因之一^[1], 据统计美国 60% 的水环境污染与非点源污染直接相关^[2], 中国 68% 和 65%

的 TP、TN 入河量也是由于非点源污染所贡献的, 其形成机理较为复杂, 降水径流是形成的自然因素, 人类不合理的土地开发利用方式则是其直接原

收稿日期: 2019-11-05

基金项目: 国家生态环境资产核算体系建立(2110105)资助

作者简介: 段 扬(1988-), 男, 助理研究员。研究方向: 流域水资源规划及流域水环境保护。E-mail: duanyang@caep.org.cn

通信作者: 吴文俊(1985-), 男, 副研究员。研究方向: 水污染防治规划模拟、水环境经济核算研究。E-mail: wwj@caep.org.cn

引用格式: 段 扬, 蒋洪强, 吴文俊, 等. 基于改进输出系数模型的非点源污染负荷估算——以嫩江流域为例[J]. 环境保护科学, 2020, 46(4): 48-55.

因^[3]。目前,针对非点源污染估算最主要的方法是JOHNS^[4]提出并完善的输出系数法,所需资料简单便于获取又具有一定精度,因此得到了广泛使用^[5-6]。近年来,我国科研工作者也利用输出系数模型概算了渭河^[7]、西苕溪^[8]、丹江口水库水源区^[9]和北京地区^[10]等地的非点源负荷并取得了不错的成果。文章基于嫩江流域2006、2010年土地利用数据,运用改进的输出系数法探讨了流域内非点源TN、TP污染负荷量以及负荷强度分布,并分析了土地利用过程、转变过程对于非点源TN、TP输出的影响。进而为嫩江流域未来农业非点源污染治理工作提供数据支撑和决策依据。

1 研究区概况

嫩江流域位于东北地区中西部,发源于大兴安岭右麓的伊勒呼里山中段,河长1370 km,流域西部、北部与南部地势较高,东部与松花江平原相连。属寒温带半湿润大陆性气候,气候特点冬季寒冷漫长、夏季凉爽多雨,年平均降雨量400~500 mm,且集中分布与6~9月份,一般占年降水量80%。

文章研究区为嫩江流域江桥水文站以上区域,面积约18.3万km²,包括了黑龙江省和内蒙古自治区的15个县(旗)的全境以及6个县(旗)的部分区域。以江桥水文站2006~2010年水质与水文监测资料为依据,运用改进后的输出系数模型估算流域的非点源污染负荷量。

2 模型及取值

2.1 输出系数模型

传统的输出系数模型表达见式(1)。

$$L = \sum_{i=1}^m E_i A_i \quad (1)$$

式(1)中, L 为各类土地某种污染物总输出量,kg/a; E_i 为第*i*中土地利用类型的某种污染物输出系数,kg·(km·a)⁻¹; A_i 为第*i*类土地利用类型面积或第*i*种牲畜数量、人口数量。

鉴于传统输出系数模型未能考虑降雨、地形等因素变化,使得精度较差,很多学者对此进行了改进^[11-13],本研究在充分吸收前人经验的基础上,提出了考虑降雨、地形及流域损失的输出系数模型,表达见式(2)。

$$L = \sum_{i=1}^n \alpha \beta \lambda E_i [A_i(I_i)] \quad (2)$$

式(2)中, α 为降雨影响因子,用来表征降雨对于非点源污染的影响; β 为地形影响因子,用来表征地形对于非点源污染的影响; λ 为流域损失系数,用来表征流域沿程损失对非点源污染的影响。

2.2 输出系数值选取

2.2.1 畜禽养殖 通过查阅相关文献^[14]将畜禽养殖分为大牲畜、猪和羊进行计算,并确定采用下式计算畜禽粪便产生量:

$$\text{畜禽粪便量} = \text{畜禽养殖量} \times \text{日排泄系数} \times \text{饲养周期} \quad (3)$$

畜禽粪便的日排泄量与品种、质量、生理状态、饲料组成和饲喂方式等均有关,取值采用文献^[14]数据。

畜禽饲养周期综合参考文献^[15-16]数据,最终确定猪为199 d、大牲畜与羊均为365 d。经筛选得到研究区畜禽养殖排泄系数及养分,取其排泄系数的10%为TN和TP的输出系数,见表1。

表1 畜禽粪便排泄系数、养分含量及输出系数

畜禽种类	粪便排泄量/kg·d ⁻¹	质量分数/%		排泄系数/kg·(a·头) ⁻¹		输出系数/kg·(a·头) ⁻¹	
		TN	TP	TN	TP	TN	TP
大牲畜	25.00	0.351	0.082	32.029	7.483	3.203	0.748
猪	4.10	0.238	0.074	3.561	1.107	0.356	0.111
羊	0.87	1.014	0.216	3.220	0.686	0.322	0.069

2.2.2 农村居民生活 农村居民生活污水TN、TP排泄系数可参照式(4)来计算。

$$E_{\text{生活}} = q \times C_i \times r \quad (4)$$

式(4)中, $E_{\text{生活}}$ 为农村生活污水输出系数; q 为

农村居民生活用水量; C_i 为生活污水中TN、TP质量浓度; r 为排水系数。最终确定研究区农村居民生活污水TN和TP排泄系数分别为1.43和0.12kg/(人·a)。

2.2.3 土地利用 对于土地利用确定输出系数目

前使用最为普遍的为查阅文献法,其最大优点在于简便快捷、费用极低。本研究通过查阅相近流域的研究成果^[17-26],并结合嫩江流域实际地理位置特征,最终确定了各土地利用类型的输出系数值,见表 2。

3 模型模拟计算

3.1 基础数据整理

嫩江流域内 2006~2010 年土地利用面积、牲畜及人口情况见表 3。

表 2 各土地利用类型输出系数

土地利用类型	kg·(hm ² ·a) ⁻¹	
	TN	TP
旱地	11.20	1.54
水田	14.86	1.68
林地	4.22	0.72
草地	6.3	0.59
城镇用地	11	0.24
水域	15	3.6

表 3 嫩江流域土地面积、牲畜及人口状况

t/a	土地利用/km ²						农村人口 /万人	畜禽养殖/万头		
	水田	旱地	林地	草地	水域	建设用地		大牲畜	猪	羊
2006	2 764	57 486	86 539	11 346	23 224	843	458	310	296	714
2007	2 879	56 320	85 814	15 044	21 061	1 358	477	147	221	592
2008	2 947	55 620	85 379	17 263	19 762	1 667	490	200	277	597
2009	3 108	53 987	84 363	22 441	16 734	2 388	494	207	328	657
2010	3 222	52 821	83 638	26 139	14 570	2 903	494	221	353	705

注:牲畜与人口状况数据来源于当年度黑龙江省及内蒙古自治区统计年鉴;土地利用数据采用 2006 和 2010 年度 1 km 精度的嫩江流域土地利用类型及分布数据,其他年度采用插值手段获得。

3.2 降雨影响因子

降雨影响因子包含降雨空间分布差异系数 α_s 与降雨年际差异系数 α_r 组成,其中, α_s 主要反映不同地区因降雨量不同所带来的差异;而 α_r 则反映不同年份的降雨条件下对非点源污染输出结果的变化。根据 α_s 的计算公式^[13],收集研究区内 17 个气象站 2006~2010 年降雨量并利用泰森多边形法确定各雨量站控制范围,并与子流域范围进行图层叠加,最终计算出各区县与整个研究区年降雨量。

对于 α_r ,则根据流域出口控制站江桥站 2006~2010 年流量及水质监测数据计算出研究区内非点源污染入河量,与先前计算的研究区年降雨量耦合建立 TN 与 TP 的回归方程。通过回归分析,建立起流域全区年平均降雨量 r 与非点源污染物入河量 L 之间的相关关系。

$$L_{DN} = 0.223 1r^2 - 138.23r + 24 951 \quad (R^2 = 0.874 6) \quad (5)$$

$$L_{DP} = 0.027 3r^2 - 32.637r + 6 039.7 \quad (R^2 = 0.890 7) \quad (6)$$

通过获取研究区内气象站 1990~2010 年降雨数据,可以得到该区多年平均降雨量为 477.64 mm,将其带入公式(5、6)得到在多年平均降雨量条件下 TN 与 TP 的年入河量分别为 9 824.85 与

1 082.29 t。因此研究区 TN、TP 的降雨年际差异系数见式(7~8)。

$$\alpha_{DN} = \frac{0.223 1r^2 - 138.23r + 24 951}{9 824.85} \quad (7)$$

$$\alpha_{DP} = \frac{0.027 3r^2 - 32.637r + 6 039.7}{1 082.29} \quad (8)$$

将 2006 和 2010 年的年降雨量带入公式(7、8)中得到嫩江流域非点源污染氮、磷的降雨年际差异系数,结果显示 2006 年降雨量接近多年平均降雨量,因此 TN 和 TP 的 α_r 仅为 1.007 与 1.010,而 2010 年由于降雨量增加使得 α_r 增长到 1.246 与 1.363。

3.3 坡度影响因子

根据坡度影响因子计算公式利用 Arcgis 中坡度计算工具,基于 DEM 数据提取出研究区及各子流域平均坡度。

3.4 流域损失系数

根据流域损失系数的定义,利用江桥水文站实测的污染物入河量与利用输出系数所计算得到的污染物输出负荷量相比计算出非点源 TN、TP 的流失系数,并与嫩江流域年径流模数进行回归分析。结果显示,2006 年 TN 与 TP 的流失系数分别为

0.065 和 0.048, 而 2010 年 TN 与 TP 的流失系数为 0.058 和 0.043。

3.5 改进模型合理性分析

将得到降雨影响因子、坡度影响因子以及流域损失系数分别带入公式(2), 得到修正后的嫩江流域非点源 TN 与 TP 的污染物入河量模拟值, 并与实测结果进行对照见, 见表 4。

表 4 模拟值与实测值对照

t/a	TN			TP		
	模拟值/t	实测值/t	误差/%	模拟值/t	实测值/t	误差/%
2006	12 233.57	11 777.63	4.44	1 544.8	1 297.41	20.71
2010	9 017.45	9 476.58	-2.99	1 066.05	1 063.04	-0.28

表 4 可知, 模型实测值与计算值较为接近, 除去 2006 年非点源 TP 误差稍高外, 其余指标误差均在 5% 以内, 说明改进模型可以较好模拟嫩江流域非点源 TN、TP 污染负荷, 精度较高, 完全符合模型的输出需求, 可以在研究区内得到进一步应用, 为指导研究区内农业非点源污染控制提供数据支撑。

4 结果与讨论

根据改进的输出系数模型, 综合考虑地形、降雨以及沿程损失等因素后计算得到了嫩江流域 2006、2010 年不同污染源类型(土地利用、畜禽养殖、农村生活)所产生的非点源 TN 与 TP 的负荷量。从时间分布上来看, 2006 年嫩江流域 TN 负荷量为 12 233.57 t, 而 2010 年出现了较大幅度的下降, 负荷量变为 9 017.45 t, 仅为 2006 年的 73.70%, 而在减少量中, 主要是旱地与水域部分构成, 二者均减少 1 285 t, 占到了全部减少量的 67.7%; 对于 TP 在 2006~2010 年这 5 年间同样出现了下降, 由 1 297.41 t 下降为 1 063.04 t, 降幅为 18.04%。嫩江流域 TN 负荷量约为 TP 负荷量的 8 倍, 这与以前的相关研究^[23]得出的结果一致, 即 TN、TP 负荷比在 5~10 之间。

4.1 不同污染源类型贡献量

不同污染源类型所产生的 TN、TP 负荷量, 见表 5。

表 5 可见, TN、TP 负荷量的贡献度中, 土地利用>畜禽养殖>农村人口排放。不同土地利用类型下, 对 TN 负荷量贡献度大小排名为旱地>林地>水域>草地>水田。2010 年相较于 2006 年由于草地

面积的大幅增加以及水域面积的不断减少导致草地贡献率由 4% 提高到 11%, 反之水域贡献率由 21% 下降为 14%。而对于 TP 而言, 旱地所产生的负荷量最大, 其次是水域与林地, 而草地和水田负荷较小, 值得说明的是由于嫩江流域水域面积的萎缩使得水域所产生的贡献度由 28% 变为 2010 年的 21%, 排名也被林地超过位列第三位。综合以上数据可以看出, 耕地对于嫩江流域非点源 TN 与 TP 的贡献率最大, 而嫩江流域作为我国粮食的主要产区之一需在今后降低化肥、农药、农膜等用量, 提高土壤肥力, 减小氮磷等污染物排放量; 畜禽养殖对于非点源污染物排放也有 10% 左右的贡献, 其影响也不容小觑, 由于缺乏排污管道以及集约型污水处理装置以及畜牧业的快速增加均加重了畜禽养殖污染负荷, 其不利影响在今后应引起足够的重视, 需切实有效的提高牲畜粪污资源化利用程度。

表 5 嫩江流域非点源 TN 与 TP 入河负荷构成 t·a⁻¹

污染源类型	TN		TP	
	2006 a	2010 a	2006 a	2010 a
畜禽养殖	973.2	171.5	616.0	109.4
农村人口	480.2	126.6	411.2	25.6
水田	301.2	25.4	278.1	23.4
旱地	4 721.7	483.5	3 436.2	351.4
林地	2 678.2	340.3	2 050.1	260.1
草地	524.2	36.6	956.5	66.6
水域	2 554.8	456.6	1 269.4	226.6
建设用地	68.0	1.1	185.5	3.0

4.2 不同县市 TN 和 TP 负荷量

利用改进的输出系数模型计算了 2006、2010 年嫩江流域各区县农业面源污染物 TN 和 TP 的负荷量及负荷强度, 见图 1。

图 1 可见, 从空间分布上来看, TN 与 TP 的污染分布较为一致, 分布较大的区域主要为鄂伦春自治旗、扎兰屯市、阿荣旗和嫩江县等地, 这些县(市)普遍耕地面积广大、农业化程度较高。从年际变化来看, 2010 年嫩江流域农业面源污染物 TN 负荷量较 2006 年减少 26.30%。21 个县中有 16 个均出现不同程度的减少, 其中鄂伦春自治旗减小量达到 1 177.67 t, 占到了总减小量的 56.34%; 而阿荣旗和牙克石市在 5 年间负荷量减小幅度也超过 100 t。

另外还有 5 个县(市)负荷量出现增加, 扎兰屯市增加量最高, 达到 419.52 t。对于 TP 而言, 2006 ~ 2010 年间负荷量总量也出现了较大幅度的下降, 具体到各县(市)有 8 个县(市)出现了下降, 总减小量

为 349.15 t, 其中鄂伦春自治旗减小量最大, 达到 275.67 t; 另有 13 个县(市)负荷量出现增加, 总增加量为 204.90 t, 其中扎兰屯市增加量最大, 达到 97.92 t。

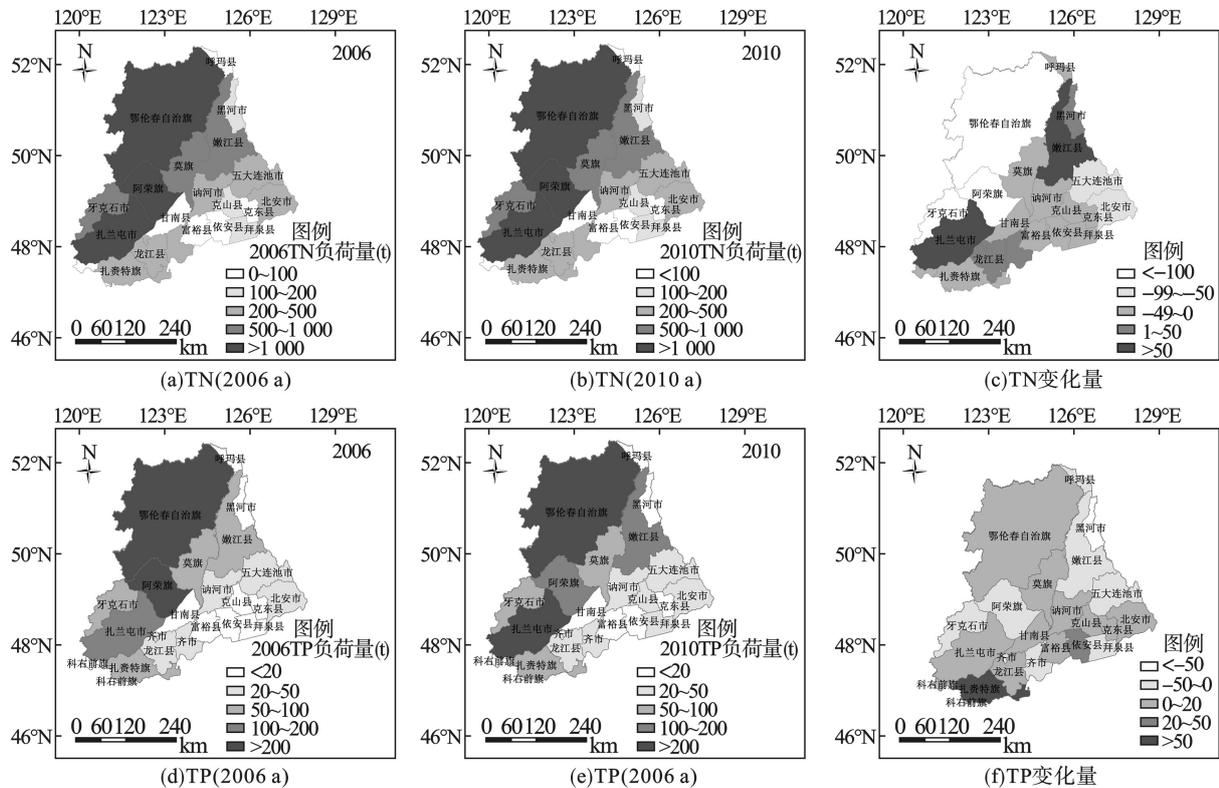


图 1 嫩江流域各县非点源 TN 与 TP 负荷量及变化量

4.3 不同县市 TN 和 TP 负荷强度

嫩江流域各区县农业面源污染物 TN 和 TP 的负荷强度见表 6。

表 6 可见, 与负荷总量相类似, 阿荣旗、鄂伦春旗、牙克石市、扎兰屯市等县市 TN 和 TP 负荷强度同样较高。反映出这些县市农业产业化程度高、农业资源丰富、同时也是嫩江流域畜禽养殖业的主要分布区。较高的化肥农药施用强度加之规模化畜禽养殖是造成其 TN 和 TP 负荷强度高的主要原因

因, 因此这些县市也是今后农业非点源污染整治的重点区域。而从年际变化来讲, 2010 年相较 2006 年 TN 负荷量出现较大幅度下降, 同理大部分县市负荷强度也出现下降, 其中阿荣旗减小幅度最大, 由 129.48 变为 96.76 kg/km²; 但仍有 5 个县市出现了负荷强度增加现象, 其中扎兰屯市增长了 24.84 kg/km², 其主要原因与土地利用类型以及降雨空间差异系数变化有关。对于 TP 而言阿荣旗和扎兰屯市同样为负荷强度减小和增加最大的县市。

表 6 嫩江流域各县农业面源污染物负荷强度 kg·km⁻²

嫩江流域各区县	TN负荷强度		TP负荷强度	
	2006 a	2010 a	2006 a	2010 a
阿荣旗	129.48	96.76	18.18	12.17
拜泉县	44.75	32.44	4.78	3.39
北安市	39.91	29.77	4.87	3.77
鄂伦春旗	85.32	63.96	12.22	7.09
富裕县	6.06	4.49	0.76	0.54

续表 6

嫩江流域各区县	TN负荷强度		TP负荷强度	
	2006 a	2010 a	2006 a	2010 a
甘南县	20.26	18.01	2.16	1.92
黑河市	32.37	35.99	4.02	3.91
呼玛县	34.23	29.30	5.25	3.21
科右前旗	73.57	72.78	8.79	8.02
克东县	46.81	34.36	4.94	3.71
克山县	46.09	33.31	4.97	3.48
龙江县	38.74	40.15	4.50	4.55
莫力达瓦	62.95	59.21	7.64	6.35
讷河市	37.08	32.43	4.30	3.65
嫩江县	46.25	59.69	5.62	7.58
齐齐哈尔市辖区	62.47	69.49	7.29	8.10
五大连池市	49.62	38.66	5.82	4.95
牙克石市	84.63	69.12	12.03	8.73
依安县	22.54	15.55	2.55	1.66
扎赉特旗	62.17	57.36	6.97	6.20
扎兰屯市	80.21	105.04	9.80	13.01

4.4 土地利用变化过程对非点源氮磷负荷量影响

土地利用为嫩江流域非点源氮磷的最主要来源,以2006年为例,占到了全部TN来源的88%和TP来源的82%。因此土地利用方式变化对

于非点源污染氮磷负荷输出量之间具有密切关联,土地利用信息的转变过程直接改变了非点源过程量的输出,进而最终影响非点源状态量的表达^[27],见表7。

表7 各土地利用类型动态度分析

土地利用类型	2006 a面积 /km ²	2010 a转出面积 /km ²	2010 a转入面积 /km ²	净变化量 /km ² /km ²	土地利用 年变化度/%	土地利用 相对动态度/%
水田	2 764	1 322	1 765	443	3.21	0.05
旱地	57 486	14 492	9 515	-4 977	-1.73	-0.55
林地	86 539	15 936	12 485	-3 451	-0.80	-0.38
草地	11 346	7 087	21 742	14 655	25.83	1.61
水域	23 224	16 167	7 429	-8 738	-7.52	-0.96
建设用地	843	351	2 412	2 061	48.90	0.23

表7可知,与2006年相比,水田、草地及建设用地面积呈现出增加态势,增加量最多的为草地,达到14 655 km²,变化度达到25.83%;而旱地、林地及水域面积则分别减小了1.73%、0.80%和7.52%。为了避免指标例如建设用地由于本底值较低所引起的变化度虚高的现象,引入土地利用相对动态度^[26]来表征某种土地利用类型变化对于研究区整体变化所做的贡献。可以看出草地和水域的相对

动态度分别为1.61%和-0.96%,表明二者对于流域土地利用变化所做贡献度最大。

2006~2010年嫩江流域土地利用转移矩阵见表8。

由表8可知,在2006~2010年间发生土地利用类型变化面积较大,约占到总量的30.47%。其中林地和旱地参与转变的绝对数量最大,达到15 902和14 419 km²;而水域、草地、水田参与其他土地利

用转变率最高,分别达到 2006 年初始面积的 69.61%、61.87% 和 47.76%。在转变过程中,林地转变为草地面积最大,为 9 624 km²,其次为水域转变为草地和水域转变为林地,分别达到 8 018 和 5 003 km²。

表 8 2006~2010 a 嫩江流域土地利用转移矩阵 km²

t		2010 a					
		水田	旱地	林地	草地	水域	建设用地
2006 a	水田	1 437	646	54	179	348	93
	旱地	1 259	42 949	4 490	3 796	2 941	1 933
	林地	26	3 371	70 405	9 624	2 811	70
	草地	104	2 627	2 882	4 235	1 254	153
	水域	359	2 617	5 003	8 018	7 007	150
	建设用地	15	213	39	51	31	491

由于土地利用变化所导致的非点源氮磷状态量,是由该土地利用类型面积变化量与其输出系数相乘得到,见表 9。

表 9 2006~2010 a 嫩江流域各土地利用类型转变状态量 t

土地利用类型	TN	TP
水田	658.30	74.42
旱地	-5 574.24	-766.46
林地	-1 456.32	-248.47
草地	9 232.65	864.65
水域	-13 107.00	-3 145.68
建设用地	2 267.10	49.46
合计	-7 979.51	-3 172.08

表 9 可知,嫩江流域 TN 和 TP 产生量分别减少 7 979.51 和 3 172.08 t,其中水域减小量最大,草地产生量增加最多。

仅仅通过计算土地利用类型转变状态量往往不能真实反映出其对于非点源氮磷负荷输出的影响,还需要汇算不同时间下土地利用过程的变化量。为此,引入土地利用类型转变过程量,借鉴文献 [27] 方法,通过采用土地利用动态变化矩阵(表 7),建立相对输出系数(两种土地利用类型输出系数差)与土地利用变化量间关系计算得到(见表 10、11)。其中正值表示在土地利用类型变化过程中氮

磷产生量增加,反之则表示减少。

表 10 2006~2010 a 嫩江流域各土地利用类型 TN 转变过程量 t

土地利用类型	水田	旱地	林地	草地	水域	建设用地
水田	-	-236.4	-57.5	-153.2	4.9	-35.9
旱地	460.8	-	-3 134.0	-1 860.0	1 117.6	-38.7
林地	27.7	2 353.0	-	2 001.8	3 030.3	47.5
草地	89.0	1 287.2	-599.5	-	1 091.0	71.9
水域	-5.0	-994.5	-5 393.2	-6 975.7	-	-60.0
建设用地	5.8	4.3	-26.4	-24.0	12.4	-

表 11 2006~2010 a 嫩江流域各土地利用类型 TP 转变过程量 t

土地利用类型	水田	旱地	林地	草地	水域	建设用地
水田	-	-9.0	-5.2	-19.5	66.8	-13.4
旱地	17.6	-	-368.2	-360.6	605.8	-251.3
林地	2.5	276.4	-	-125.1	809.6	-3.4
草地	11.3	249.6	37.5	-	377.5	-5.4
水域	-68.9	-539.1	-1 440.9	-2 413.4	-	-50.4
建设用地	2.2	27.7	1.9	1.8	10.4	-

表 10 和表 11 可知,不同土地利用类型转变对于总量增减贡献度不同,对于 TN 而言,水域转变为草地削减量最大,达到 6 975.7 t,其次是水域转变为林地和旱地转变为林地,分别为 5 393.2 t 和 3 134.0 t;而林地转变为水域、林地转变为旱地、林地转变为草地时 TN 负荷量表示为增加,增加量为 3 030 t、2 353 t 和 2 301 t。而对于 TP 来讲情况较为相似,水域转变为草地以及水域转变为林地削减量最大;而林地转变为水域及旱地转变为水域增加量最大。

5 结论

文章应用改进的输出系数模型并以嫩江流域为研究对象,计算并分析了其 2006、2010 年农业非点源污染物 TN 和 TP 的产生量及入河量,并与实测值进行校对。结果表明,2010 年 TN 与 TP 入河量较 2006 年均有明显下降;通过对污染物空间分布进行计算发现区域内污染物分布空间差异性大;土地利用作为 TN 和 TP 负荷量的最大来源其相对变化对于污染物分布有着重要影响。主要结论如下。

1) 2006 年嫩江流域 TN 入河量为 12 233.57 t, TP 入河量为 1 297.41 t; 2010 年 TN 入河量为 9 017.45 t, TP 入河量为 1 063.04 t; 分别较 2006 年

减小 26.30% 和 18.04%。

2) 不同污染物来源对于 TN 和 TP 负荷量贡献度显著不同, 其中土地利用为主要的来源, 其次是畜禽养殖和农村生活。而在各种土地利用类型中旱地所产生的负荷量最大, 其次是水域与林地。

3) 不同县市 TN 和 TP 负荷量差异较大, 鄂伦春自治旗、扎兰屯市、阿荣旗的 TN 与 TP 负荷量大; 从年际变化来看, 鄂伦春自治旗在 2006~2010 年间 TN 与 TP 减少量最多, 而扎兰屯市增加量最多。

4) 从 TN 与 TP 负荷强度来看, 阿荣旗、鄂伦春自治旗、牙克石市、扎兰屯市等县市较高; 从年际变化角度看, 阿荣旗负荷强度减小量最大而扎兰屯市增加量最大。

5) 不同土地利用类型转变对于总量增减贡献度不同。①与 2006 年相比, 2010 年水田、草地及建设用地面积呈现出增加态势而旱地、林地及水域面积则出现减小; ②2006~2010 年间有 30.47% 的土地发生变化, 其中林地和旱地参与转变的绝对数量最大; ③在转变过程中, 林地转变为草地面积最大, 为 9 624 km²; ④在 2006~2010 年间非点源 TN 和 TP 产生量总计分别减小了 7 979.51 和 3 172.08 t, 其中水域减小量最大, 而草地产生量则增加最多; ⑤根据土地利用类型 TN 与 TP 转变过程量看出水域转变为草地这一过程对于氮磷的削减量最大而林地转变为水域这一过程对于氮磷的增加量最大。

参考文献

- [1] ARHONDITSIS G B, TSIRTSIS G, ANGELIDIS M O, et al. Quantification of the effects of nonpoint nutrient sources to coastal marine eutrophication: applications to a semi-enclosed gulf in the Mediterranean Sea[J]. *Ecological Modelling*, 2000, 129(2): 209 - 227.
- [2] 杜娟, 李怀恩, 李家科. 基于实测资料的输出系数分析与陕西泾河流域非点源负荷来源探讨[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(4): 827 - 837.
- [3] 杨彦兰, 申丽娟, 谢德体, 等. 基于输出系数模型的三峡库区(重庆段)农业面源污染负荷估算[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2015, 37(3): 112 - 119.
- [4] JOHNES P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 183(3-4): 323 - 349.
- [5] JOHNES P J, HEATHWAITE A L. Modeling the impact of land use change on water quality in agricultural catchments[J]. *Hydrological Processes*, 1997, 11(3): 269 - 286.
- [6] THORNTON J A, RAST W, HOLLAND M M, et al. Assessment and control of nonpoint source pollution of aquatic ecosystems: a practical approach[M]. New York: The Parthenon Publishing Group, 1999: 296 - 299.
- [7] 蔡明, 李怀恩, 庄咏涛, 等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. *水利学报*, 2004(7): 40 - 45.
- [8] 吴一鸣, 李伟, 余昱葳, 等. 浙江省安吉县西苕溪流域非点源污染负荷研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(10): 1976 - 1985.
- [9] 王国重, 李中原, 左其亭, 等. 丹江口水库水源区农业面源污染物流失量估算[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(3): 415 - 422.
- [10] 刘亚琼, 杨玉林, 李法虎. 基于输出系数模型的北京地区农业面源污染负荷估算[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 7 - 12.
- [11] 陆建忠, 陈晓玲, 肖靖靖, 等. 改进的输出系数法在农业污染负荷估算中的应用[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 46(3): 373 - 378.
- [12] 陈亚荣, 阮秋明, 韩凤翔, 等. 基于改进输出系数法的长江流域面源污染负荷估算[J]. *测绘地理信息*, 2017, 42(1): 96 - 99.
- [13] 沈珍瑶, 刘瑞民. 长江上游非点源污染特征及其变化规律[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [14] 侯世忠, 张淑二, 战汪涛, 等. 山东畜禽粪便产生量估算及其环境效应研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(11): 78 - 81.
- [15] 杨朝飞. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 朱建春, 张增强, 樊志民, 等. 中国畜禽粪便的能源潜力与氮磷耕地负荷及总量控制[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(3): 435 - 445.
- [17] 邢亚秀, 陈贺. 北京市农业面源污染负荷及入河系数估算[J]. *中国水土保持*, 2016(5): 34 - 37.
- [18] 张静, 何俊仕, 周飞, 等. 浑河流域非点源污染负荷估算与分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(6): 69 - 73.
- [19] 李娜, 韩维峰, 沈梦楠, 等. 基于输出系数模型的水库汇水区农业面源污染负荷估算[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(8): 224 - 230.
- [20] 李根, 毛锋. 我国水土流失型非点源污染负荷及其经济损失评估[J]. *中国水土保持*, 2008, 443(2): 9 - 11.
- [21] 马亚丽, 敖天其, 张洪波, 等. 基于输出系数模型濛溪河流域泸县段面源分析[J]. *四川农业大学学报*, 2013, 31(1): 53 - 59.
- [22] 史志华, 蔡崇法, 丁树文, 等. 基于 GIS 的汉江中下游农业面源氮磷负荷研究[J]. *环境科学学报*, 2002, 22(4): 473 - 477.
- [23] 丁晓雯, 刘瑞民, 沈珍瑶. 基于水文水质资料的非点源输出系数模型参数确定方法及其应用[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2006, 42(5): 534 - 538.
- [24] 刘亚群. 旭水河贡井段非点源污染负荷估算研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [25] MA X, LI Y, ZHANG M, et al. Assessment and analysis of non-point source nitrogen and phosphorus loads in the Three Gorges Reservoir Area of Hubei Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2011(412/413): 154 - 161.
- [26] 王全金, 徐刘凯, 向速林, 等. 应用输出系数模型估算赣江下游非点源污染负荷[J]. *人民长江*, 2011, 42(23): 30 - 33.
- [27] 崔超, 刘申, 翟丽梅, 等. 香溪河流域土地利用变化过程对非点源氮磷输出的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(1): 129 - 138.