

北京市农业面源污染负荷及入河系数估算

邢宝秀, 陈 贺

(北京师范大学 环境学院, 北京 100875)

[关键词] 输出系数; 农业面源污染; 负荷; 入河系数; 北京市

[摘要] 采用考虑降雨影响因子的输出系数模型, 以实测数据为基础, 结合水文资料和 GIS 技术, 估算北京市 2013 年农业面源污染物总氮、总磷负荷。根据农业面源污染物总氮、总磷负荷与年径流模数的相关关系, 计算北京市 2013 年五大水系农业面源污染物总氮、总磷入河系数。结果表明: 2013 年北京市农业面源污染物总氮负荷为 17 859.586 0 t, 总磷负荷为 3 089.559 0 t; 从污染源类型来看, 2013 年农业面源污染物总氮、总磷负荷较高的均为农村生活和畜禽养殖, 分别占污染物负荷总量的 45.9%、27.7% 和 83.5%、15.4%; 2013 年潮白河农业面源污染物总氮入河系数最高, 永定河农业面源污染物总磷入河系数最高, 北运河农业面源总氮和总磷污染负荷最高, 分别为 12 859.577 5 和 2 291.547 1 t, 其次为潮白河及永定河。

[中图分类号] S157 [文献标识码] A [文章编号] 1000-0941(2016)05-0034-04

随着全球人口增长及经济发展, 水污染已成为主要的环境问题之一, 而农业面源污染是造成水污染的重要原因。据调查, 目前 30%~50% 的地球表面受到非点源污染影响^[1], 在全世界不同程度退化的 12 亿 hm² 耕地中约 12% 是由农业面源污染引起的^[2]。我国

是农业生产大国, 农业生产发展迅速, 但同时农作物种植化肥和农药施用量、作物秸秆等农业废弃物, 以及畜禽粪便产生量等明显增加, 加剧了农业面源污染问题。

国内外学者对农业面源污染问题非常关注, 建立了许多农业面源污染评价模型, 而输出系数模型避开了面源污染发生和发展的复杂过程, 所需数据少, 获取方便, 适用于数据缺乏地区的非点源污染负荷核算。Johnes 在输出系数模型中加入了牲畜和人口等因素的

[基金项目] 受国家自然科学基金(51179007)、北京市自然科学基金(8132039)、公益性行业科研专项(201401014)、中央高校基本科研业务费专项资金资助

[10] 吴冰, 朱元骏, 邵明安. 含砾石土壤坡面流速及产流产沙过程研究[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(1): 99-103.

[11] 景民晓, 谢永生, 赵暄, 等. 土石混合弃土堆置体产流产沙模拟研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 57-61.

[12] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. Washington DC: USDA, Agricultural Handbook 703, 1997: 384.

[13] Flanagan D C, Nearing M A. USDA-water erosion prediction project: Hillslope profile and watershed model documentation [M]. Indiana: West Lafayette, National Soil Erosion Research Laboratory, USDA ARS, 1995: 298.

[14] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catch-

ments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(6): 527-544.

[15] 崔俊华, 孟文芳, 华玉芝, 等. 比重瓶法快速测定高浊水中含砂量[J]. 中国给水排水, 2003, 19(增刊1): 159-160.

[16] 符素华. 土壤中砾石存在对入渗影响研究进展[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 171-175.

[17] 符素华, 路炳军, 叶芝茵. 地表砾石对降雨径流及土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 15-18.

[作者简介] 张维静(1989—), 女, 陕西咸阳市人, 硕士研究生, 从事水土保持方向的研究工作; 通信作者王健(1973—), 男, 陕西商洛市人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀与流域管理方面的研究。

[收稿日期] 2015-06-30

(责任编辑 李杨杨)

影响,综合考虑了土地利用类型、牲畜数量和分布状况、农村居民的面源污染排放和处理水平等不同污染源类型的输出系数,从而建立了更完备的输出系数模型^[3];蔡明等提出了考虑降雨和流域损失的输出系数模型^[4];丁晓雯等改进的输出系数模型主要表征下垫面因子中坡度的影响^[5];陆建忠等利用改进的考虑降雨和地形的输出系数模型,对鄱阳湖流域红壤多山丘陵地区农业非点源污染负荷进行了估算^[6]。在上述研究成果的基础上,本研究以北京市为研究对象,利用水文、水质资料测算北京市五大流域入河系数,采用考虑降雨影响因子的输出系数模型,借助 GIS 技术,计算区域土地利用、畜禽养殖、农村生活的总磷、总氮污染负荷,估算农业面源污染负荷,并对其变化趋势进行预测分析,提出相关防控措施和建议。

1 研究区概况

北京市地处华北平原西北隅,位于 N39°08′—41°05′、E115°25′—117°30′,共有 16 个区(县),土地总面积 16 807 km²^[7]。地处海河流域,属典型的暖温带半湿润大陆性季风气候区。天然河道自西向东贯穿五大水系,即:大清水系、永定河水系、北运河水系、潮白河水系和蓟运河水系。地势西北高东南低,土壤类型主要为褐土和潮土,地带性植被为落叶阔叶林。土地利用类型主要有耕地、园地、林地、草地、城镇及工矿用地、交通运输用地等,随着经济发展,城镇及工矿用地、交通运输用地面积持续增加,占用大量耕地、园地、林地、草地等。2013 年全市常住人口为 2 114.8 万人,其中常住城镇人口为 1 825.1 万人、常住乡村人口为 289.7 万人,乡村人口占比重较小。畜禽养殖业发展迅速,2006 年以来产值持续增长,2013 年北京市养殖大牲畜 21.09 万头、猪 189.23 万头、羊 59.47 万只、家禽 2 524.88 万只。

2 研究方法

2.1 输出系数模型

Johnes 输出系数模型在大尺度流域面源污染负荷的研究中表现出了独特的优势。经蔡明等改进后的输出系数模型充分考虑水文因素的影响,在模型中体现水文、产汇流等过程的影响,更加准确地预测不同年份的总氮、总磷负荷^[4]。本研究采用的输出系数模型计算公式为

$$L_j = \sum_{i=1}^n \alpha E_{ij} A_i + P \quad (1)$$

$$P = c a Q / 10^3 \quad (2)$$

式中: L_j 为流域污染物 j 的总负荷,kg/a; α 为降雨影响

因子,用来表征降雨对污染物输出的影响; E_{ij} 为污染物 j 在第 i 种土地利用类型中的输出系数[kg/(hm²·a)]或第 i 种畜禽的排泄系数[kg/(只·a)、kg/(头·a)]或人口的输出系数[kg/(人·a)]; A_i 为流域中第 i 种土地利用类型的面积(hm²)或第 i 种牲畜的数量(只、头)或人口数量(人); P 为降水产生的营养输入量,kg/a; c 为降水中污染物的浓度,g/m³; a 为流域年降雨量,m³/a; Q 为径流系数。

2.2 输出系数确定

在输出系数模型中,污染物的输出系数是指单位时间内某种土地利用方式下输出的污染物总负荷的标准化估计^[7],确定合理的输出系数是成功估算面源污染物输出负荷的关键。根据耿润哲等^[8]对密云水库流域非点源污染负荷的估算及特征分析,不同土地利用类型、畜禽养殖和农村生活的面源污染物输出系数见表 1。

表 1 不同污染源输出系数取值

项目	污染源	总氮输出系数	总磷输出系数
农业用地 [kg/(hm ² ·a)]	耕地	2.970	0.0410
	林地	0.240	0.0017
	草地	1.570	0.0130
畜禽养殖[kg/(只·a)、 kg/(头·a)]	大牲畜	7.360	0.3100
	猪	0.410	0.1500
	羊	1.400	0.0450
	家禽	0.071	0.0040
农村生活 [kg/(人·a)]	乡村人口	2.830	0.8900

2.3 降雨影响因子计算

相关研究表明,降雨量对总氮、总磷流失量有较显著的影响,而雨强主要对产流时间及养分浓度出现峰值的时间有一定影响,对污染物流失量影响不大,因此降雨对非点源污染负荷的影响主要体现在降雨量指标上^[9-12]。根据流域多年降雨数据和断面水质资料,借助 GIS 技术,得到流域年降雨量和非点源污染物年入河量。通过回归分析,建立流域 2003—2013 年降雨量 r 与非点源污染物年入河量 L 的相关关系,再根据北京市多年平均降雨量(528.43 mm),得到多年平均降雨量条件下溶解态氮、溶解态磷的年入河量(8 378.175 0、685.001 5 t/a),则溶解态氮、溶解态磷的降雨影响因子(α_{DN} 、 α_{DP})计算公式见式(3)、(4),结果见表 2。

$$\alpha_{DN} = (16.024r - 89.44) / 8\ 378.175\ 0 \quad (3)$$

$$\alpha_{DP} = (1.540\ 5r - 129.05) / 685.001\ 5 \quad (4)$$

2.4 入河系数测算

流域出口地表径流污染负荷由点源污染负荷和非点源污染负荷组成。由于流域非点源污染负荷的产生主要是降雨引起的,所以可以近似地认为非点源污染负荷等于年降雨径流负荷,而点源污染负荷等于年基

表 2 2003—2013 年北京市溶解态氮、磷降雨影响因子

年份	降雨量(mm)	α_{DN}	α_{DP}
2003	444.9	0.840	0.812
2004	483.5	0.910	0.899
2005	410.9	0.775	0.735
2006	318.0	0.598	0.527
2007	483.9	0.915	0.900
2008	626.3	1.197	1.220
2009	480.6	0.909	0.892
2010	522.5	0.989	0.987
2011	720.6	1.368	1.432
2012	733.2	1.391	1.460
2013	578.9	1.096	1.114

流负荷。因此,地表径流中的非点源污染负荷可以由年径流污染负荷扣除年基流负荷得到。本研究分别对北京市各流域断面总氮、总磷年监测量与实测年径流量进行相关性分析,得出以下结果。

(1)北运河流域。流域出口非点源污染物年监测值及非点源污染物年入河系数见表 3。年入河系数计算公式分别为

$$\lambda_N = q^{2.422}/13.550 \quad (5)$$

$$\lambda_P = q^{1.612}/111.916 \quad (6)$$

式中: λ_N 为总氮负荷年入河系数; λ_P 为总磷负荷年入河系数; q 为年径流模数。

表 3 北运河流域出口非点源污染物年监测值及

年份	非点源污染物年入河系数			
	总氮负荷(t)	总磷负荷(t)	λ_N	λ_P
2004	4 622.118 6	573.843 0	0.391	0.264
2007	3 936.541 2	488.727 0	0.379	0.238
2010	4 983.336 8	618.688 7	0.498	0.302
2011	4 666.349 4	579.334 3	0.469	0.284
2013	5 138.144 6	637.908 3	0.521	0.312

(2)永定河流域。流域出口非点源污染物年监测值及非点源污染物年入河系数见表 4。年入河系数计

表 6 2013 年北京市各流域非点源污染物负荷

水系	非点源污染物总氮负荷	降雨输入总氮负荷	总氮负荷	非点源污染物总磷负荷	降雨输入总磷负荷	总磷负荷
北运河	10 817.583 5	2 041.994 0	12 859.577 5	2 277.041 1	14.506 0	2 291.547 1
永定河	270.439 5	51.049 9	321.489 4	56.926 0	0.362 6	57.288 6
潮白河	2 433.956 2	459.448 7	2 893.404 9	512.334 3	3.263 7	515.598 0
大清河	121.976 8	23.025 1	145.001 9	25.675 4	0.163 6	25.839 0
蓟运河	552.297 1	104.255 0	656.552 1	116.255 5	0.740 6	116.996 1

(2)污染源分析。2013 年北京市农业面源污染物总氮、总磷负荷分别为 17 859.586 0 和 3 089.559 0 t, 见表 7。从污染源来看,总氮负荷较高的是农村生活和畜禽养殖,分别占总氮负荷总量的 45.9%和 27.7%;总磷污染负荷较高的也是农村生活和畜禽养殖,分别占总磷负荷总量的 83.5%和 15.4%。随着北京市社会经济发展和流域内城郊化的加快,人们生活水平不断

算公式分别为

$$\lambda_N = q^{2.207}/8.538 \quad (7)$$

$$\lambda_P = q^{1.174}/2.891 \quad (8)$$

表 4 永定河流域出口非点源污染物年监测值及

年份	非点源污染物年入河系数			
	总氮负荷(t)	总磷负荷(t)	λ_N	λ_P
2003	26.469 7	15.927 0	0.109	0.319
2007	27.248 2	16.395 4	0.105	0.320
2010	35.033 4	21.079 8	0.140	0.412
2013	26.936 8	16.208 0	0.109	0.317

(3)潮白河流域。流域出口非点源污染物年监测值及非点源污染物年入河系数见表 5。年入河系数计算公式分别为

$$\lambda_N = q^{-0.145}/1.424 \quad (9)$$

$$\lambda_P = q^{-0.611}/4.744 \quad (10)$$

表 5 潮白河流域出口非点源污染物年监测值及

年份	非点源污染物年入河系数			
	总氮负荷(t)	总磷负荷(t)	λ_N	λ_P
2005	2 229.902 4	41.402 8	0.891	0.087
2007	1 967.143 2	36.524 0	0.842	0.079
2008	2 112.726 0	73.903 9	0.918	0.160
2010	1 395.464 4	25.909 7	0.620	0.056
2013	2 086.686 8	38.743 7	0.940	0.084

(4)大清河、蓟运河流域。由于数据缺乏,考虑到与永定河水文特征相似,距离较近,因此大清河非点源污染物入河系数选取永定河的计算公式。同样,蓟运河入河系数取值参照潮白河。

3 结果与讨论

(1)各流域污染物负荷。利用输出系数模型计算 2013 年北京市各流域农业面源污染总氮、总磷负荷,结果见表 6。

提高,导致农村生活类污染源产生的负荷占比较高。在畜禽养殖方面,规模化养殖的推广使得畜禽养殖业成为农业面源污染的重要污染源。

(3)污染物空间分布。北京市各区县的农业面源污染总氮、总磷负荷量差异较大(表 8)。其中,地处京郊,属传统作物种植区的大兴、顺义、房山、昌平和通州区农业面源污染物总氮、总磷负荷较大。

表7 2013年北京市各污染源农业面源污染总氮、总磷负荷

污染源	总氮负荷(t)	总磷负荷(t)
土地利用	1 653.263 0	12.520 0
畜禽养殖	4 953.312 0	476.981 0
农村生活	8 190.020 0	2 578.300 0
降雨	3 062.991 0	21.758 0

4 结 语

本研究采用考虑降雨影响因子的输出系数模型,

表8 2013年北京市各区县农业面源总氮、总磷污染负荷

区(县)	总氮污染负荷	总磷污染负荷
东城区	126.677 5	22.573 6
西城区	153.187 1	27.297 6
朝阳区	1 376.959 1	250.000 0
丰台区	20.623 7	88.636 3
石景山区	155.361 5	27.685 1
海淀区	1 292.825 5	230.074 6
门头沟区	177.844 9	31.691 5
房山区	293.325 5	52.269 9
通州区	2 445.117 6	440.104 9
顺义区	2 007.600 0	359.327 8
昌平区	3 781.133 4	5.203 2
大兴区	1 226.652 8	240.6653
怀柔区	1 254.359 3	220.506 6
平谷区	2 092.194 6	370.084 3
密云县	1 352.253 7	243.943 8
延庆县	877.957 2	156.449 9

在已有研究成果的基础上,计算北京市五大水系的农业面源污染物年入河系数,以及2013年北京市各区县农业面源污染物总氮、总磷负荷。

(1)由于土地利用和管理状况不同,2013年北京市各流域面源污染物入河系数相差较大。其中:潮白河农业面源污染物总氮入河系数最高,为0.940;永定河总磷入河系数最高,为0.317。

(2)2013年北京市农业面源污染物总氮、总磷负荷分别为17 859.586 0、3 089.559 0 t。农村生活和畜禽养殖是总氮、总磷污染负荷的主要来源,分别占总氮负荷总量的45.9%和27.7%,占总磷负荷总量的83.5%和15.4%。北运河总氮和总磷负荷最高,分别为12 859.577 5、2 291.547 1 t,其次为潮白河及永定河。从污染物空间分布来看,大兴、顺义、房山、昌平和通州区的农业面源污染物总氮、总磷负荷较大。

(3)北京市农业面源污染形势严峻。在农业非点源污染防治中,应突出重点,对污染严重的流域加强监控;加强北京市农村生活基础设施改造,严格监控畜禽

养殖业发展动态,采取有针对性的预防和控制措施。

[参考文献]

- [1] Dennis L, Corwin K. Non-point pollution modeling based on GIS[J]. Soil and Water Conservation, 1998(1): 75-88.
- [2] 崔键, 马友华, 赵艳萍, 等. 农业面源污染的特性及防治对策[J]. 中国农学通报, 2006, 22(1): 335-341.
- [3] 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): 323-349.
- [4] 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.
- [5] 丁晓雯, 沈珍瑶, 刘瑞民, 等. 基于降雨和地形特征的输出系数模型改进及精度分析[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(2): 306-309.
- [6] 陆建忠, 陈晓玲, 肖靖靖, 等. 改进的输出系数法在农业污染源估算中的应用[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2012, 46(3): 373-378.
- [7] 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.
- [8] 耿润哲, 王晓燕, 焦帅, 等. 密云水库流域非点源污染负荷估算及特征分析[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1484-1492.
- [9] Li Yong, Wang Chao, Tang Hongliang. Research advances in nutrient runoff on sloping land in watersheds [J]. Aquatic Ecosystem Health and Management, 2006, 9(1): 27-32.
- [10] 窦培谦, 王晓燕, 房孝铎, 等. 石匣小区氮磷坡面流失特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(4): 19-24.
- [11] 窦培谦, 王晓燕, 王丽华. 非点源污染中氮磷迁移转化机理研究进展[J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2006, 27(2): 93-98.
- [12] 傅涛, 倪九派, 魏朝富, 等. 不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 71-74.

[作者简介] 邢宝秀(1991—), 女, 山东滨州市人, 硕士研究生, 主要从事河流水生态方面的研究。

[收稿日期] 2015-07-22

(责任编辑 李杨杨)