

云蒙湖流域非点源磷污染时空变化研究

孟晓云^{1,2}, 于兴修², 泮雪芹^{1,2}

(1. 临沂大学 资源环境学院, 山东 临沂 276000;

2. 临沂大学 水土保持与环境保育研究所 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 山东 临沂 276000)

摘 要:运用输出系数模型,在 GIS&RS 支持下,对云蒙湖流域非点源磷污染进行了时空动态模拟。结果表明,1986—2010 年,云蒙湖流域非点源磷污染负荷量明显增加,1986、1995 与 2010 年 TP 负荷量分别为 100.98、123.57、144.36 t;从空间分布来看,TP 高负荷区主要分布于流域的河谷低平地带,主要是由于该区集中了大部分农业耕作区,化肥施用量高;从土地利用类型来看,耕地非点源污染 TP 逐年增加,其贡献率也逐年增加,由 1986 年的 89.5%,1995 年 91.35% 上升至 2010 年 92.02%,林地、草地 TP 变化较小,贡献率呈减小趋势,居民用地 TP 增加幅度大,但由于面积较小,其贡献率较小;对于子流域而言,耕地面积比例高的子流域,TP 负荷强度增加程度较大,TP 负荷强度较大的子流域逐渐由中东部地区向全流域扩展。

关键词:输出系数模型;云蒙湖流域;非点源污染;土地利用结构;地理信息系统

中图分类号:X592

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)04-0091-04

Spatio-temporal Change of Non-point Source Phosphorous Pollution in Yunmeng Lake Watershed

MENG Xiao-yun^{1,2}, YU Xing-xiu², PAN Xue-qin^{1,2}

(1. School of Resources and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276000, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Environmental Protection, Institute of Soil and Water Conservation & Environmental Protection, Linyi University, Linyi, Shandong 276000, China)

Abstract:Export coefficient mode was used to analyze the spatio-temporal changes of the non-point source (NPS) phosphorous pollution based on GIS&RS. The result indicates that the TP load caused by land use increased from 100.98 t in 1986, to 123.57 t in 1995, to 144.36 t in 2010; as far as spatial distribution of the TP load is concerned, the high phosphorous load mainly distributes in the flat River Valley, because there are many farm lands distributed in that region. As for land-use type, different land uses have different contributions to the total non point source pollution load, the TP from farm-land increased year by year, the contribution rate, is 89.5% in 1986, 91.35% in 1995 and 92.02% in 2010, the load of the forest-land and the grass-land had a little change, but the contribution rate decreases gradually, the residential load increases by a large margin, however, the contribution rate is very little. In the term of the sub-basin, the higher the proportion of the farm-land is, the more the TP load increases, the high TP load of the sub-basin expands from the eastern and central region to the whole watershed.

Key words:export coefficient model; Yunmeng Lake watershed; non-point source pollution; land-use structure; GIS

磷是影响水体富营养化的关键因子^[1-3];国内外大量研究表明,要防止水体富营养化,关键是对磷来源进行控制^[4-5]。随着点源污染的有效控制,非点源污染成

为水体污染的主要因素之一^[6-7],而非点源磷污染的发生受自然因素(如降雨、地形、地貌)和人为因素(植被覆盖、农药化肥的使用、农田灌溉)的共同影响与制

约^[8],由于短期内自然因素变化不大,因而,可以通过改变土地利用方式达到控制非点源污染的目的^[9]。

流域是介于地块和区域尺度之间的过渡单元^[10],从流域尺度进行非点源污染研究可以加深对非点源污染的机理研究,同时为以后的污染控制和流域综合治理提供依据^[11]。云蒙湖流域地处山东省中南部沂蒙山区腹地,位于东经 117°45′—118°23′,北纬 35°27′—36°20′,流域控制面积 1 693 km²。该流域属暖温带大陆性季风气候,年均降水量 822.2 mm,季节差异大,主要集中于 6—9 月份。流域内土壤以棕壤与褐土为主,土层瘠薄,农业用地方式以坡耕地和梯田为主,果园分布广泛。流域下游的云蒙湖是临沂市生活用水的重要水源地,由于土地利用方式不合理和管理不当,致使水土流失和水体污染未能从根本上得到控制,大量研究表明,土地利用结构与水量/水质间存在显著相关性^[7],因而定量分析土地利用结构对水质时空变化的影响及识别关键源区具有十分重要的现实意义^[12]。

目前,云蒙湖流域非点源污染资料缺乏,短期内难以开展大量精细实验,而具有一定精度的输出系数模型所需参数少,操作简便,可满足大中尺度流域的非点源污染负荷研究^[13]。本研究应用输出系数模型,在 GIS 和 RS 支持下,分析近 25 a 来土地利用变化对非点源磷污染负荷时空变化的影响,为云蒙湖流域的非点源污染治理和控制提供科学依据。

1 模型与方法

1.1 输出系数模型

20 世纪 70 年代初期,Johns 等人提出了输出系

数模型,该模型主要用来估算土地利用和湖泊富营养之间的关系^[14]。该模型避开了非点源污染发生的复杂过程,为大中型流域的长期非点源污染研究提供了一种新的途径。输出系数模型的一般表达式为:

$$L_j = \sum_{i=1}^m E_{ij} \cdot A_i + P \tag{1}$$

式中: j ——污染物类型; i ——流域中的土地利用类型,共 m 种; E_{ij} ——污染物 j 在流域第 i 种土地利用类型中的输出系数[kg/(hm²·a)];(1) 当 A_i 为第 i 种土地利用类型的面积(hm²)时, L_j 为污染物 j 在流域的总负荷量(kg/a);(2) 当 A_i 为第 i 种土地利用类型占流域面积比例(%)时, L_j 为污染物 j 在流域的单位面积负荷量(kg/a),即负荷强度; P ——由降雨输入的营养物数量(kg),不考虑。在输出系数模型中,关键是确定输出系数值,影响输出系数模型的因素众多,主要包括流域内的地形地貌、土地利用类型、土壤、气候、植被等。参考国内外相关研究,结合云蒙湖流域的相关资料, E_{ij} 通过降雨量、径流系数和磷的径流流失浓度确定,其求算见式(2):

$$E_{ij} = H \cdot V_{ij} \times 10^{-2} = R \cdot \partial \cdot V_{ij} \times 10^{-2} \tag{2}$$

式中: H ——径流深度(mm); V_{ij} ——污染物在 j 流域第 i 种土地利用类型的径流流失浓度(mg/L), R ——降雨量; ∂ ——径流系数。

1.2 实验设置及样品分析

模拟降雨试验于 2011 年 6—8 月在双河峪小流域进行。该流域地处云蒙湖畔,是典型农业小流域,海拔高度 170~500 m,耕地土层≤50 cm,在耕地、林地、草地 3 种具有良好代表性的土地利用类型上建立径流小区(表 1)且不施任何肥料。

表 1 各径流小区背景信息

地类	平均坡度(°)	面积/(m×m)	平均覆盖度/%	植被类型	土壤质地
耕地	5	7×21	75	花生和果园	粉砂质壤土
林地	25	5×20	73	侧柏	砂质壤土
草地	5	2×5	80	灌草	粉砂质壤土

降雨装置采用中国科学院水土保持研究所研制的 BX—1 型野外人工模拟降雨器,降雨高度 3 m,有效面积为 3 m×5 m,降雨强度设置为 80 mm/h(云蒙湖流域气象资料显示,77~82 mm/h 为出现频率最高的降雨强度范围),降雨历时设定为产流后 30 min,每种土地利用类型各做 3 次降雨试验,采集的径流样品经酸化后立即放入冰箱冷藏保存。总磷(TP)的测定方法:取水沙混合样 10 ml 摇匀,经碱性过硫酸钾高温(120℃)消解后用钼锑抗分光光度法测定。各土地利用类型径流系数通过对每次降雨的径流总量和降雨量进行监测得到。磷素输出计算不包括水域。

1.3 输出系数估算

根据降雨量、径流系数和测定的 TP 浓度,结合输出系数模型式(1)和(2),得到耕地、林地、草地的输出系数,结果见表 2;居民用地输出系数通过查阅文献^[15]获得,取值为 0.24 kg/(hm²·a)。

表 2 根据实验估算的 TP 输出系数 kg/(hm²·a)

地类	耕地	林地	草地	居民用地
TP	0.62	0.16	0.21	0.24

输出系数与土地利用方式、化肥的施用量和土壤性质等有关。由于短期内土壤性质变化不大,所以不同年份同一土地利用类型下径流中的磷浓度主要取

决于化肥的施用量^[16]。因而可根据施肥量的变化对实验估算的磷输出系数进行修正,从而求出其它年份不同土地利用类型的磷输出系数。徐文佳等^[17]的研究表明:地表径流引起磷肥的流失率占施肥量的 5%,草地和林地一般不施肥,因而,居民用地、林地和草地均不作修正。根据实地问卷调查资料和云蒙湖流域相应年份的统计年鉴,流域内耕地施用化肥量(折纯量)见表 3。修正后,1986 年、1995 年和 2010 年的磷素输出系数分别为 0.87,1.12,1.37 kg/(hm²·a)。

表 3 1986—2010 年云蒙湖流域化肥
(磷折纯量)施用状况

年份	1986	1995	2010
磷	5	10	15

2 数据来源与处理

本研究使用的数据包括:(1) 1986 年、1995 和 2010 年 3 期 Landsat TM 影像资料,运用 RS 和 GIS 技术从遥感影像中提取土地利用类型信息;根据《全国土地分类(试行)》的分类体系和云蒙湖流域土地用途、利用方式和覆盖特征等,结合野外勘查,将土地利用划分为:耕地、林地、草地、居民用地、水域(不考虑)。(2) 1:10 万地形图,将地形图进行扫描、数字化,利用 ArcGIS 9.0 的 3D 分析模块生成数字高程模型(DEM),运用 Hydrology 功能模块,结合地形、河网、土壤提取云蒙湖流域边界及 88 个子流域;(3) 人地系统主题数据库提供的 1971—2000 年近 30 a 的 1 km² 平均降雨量栅格数据及人工降雨数据;(4) 根据流域边界提取流域内降雨量栅格数据、土地利用数据。最后利用 ArcGIS 9.0 结合降雨量栅格数据、土地利用数据、流域分布图和输出系数模型,分析流域非点源污染的时空变化特征。

3 结果与分析

3.1 TP 负荷总量分析

根据输出系数和土地利用现状图,利用 ArcGIS 9.0 可得到云蒙湖流域 1986、1995 和 2010 年 3 期 TP

空间分布图(附图 1)。从附图 1 可见,TP 高负荷区主要分布于流域的河谷低平地带,该区域集中了大部分农业耕作区;地势较高的山脊地带主要以林地和草地为主,负荷量相对较低。从时间变化来看,1986 年 TP 负荷相对较低,1995 年负荷有一定程度增加,到 2010 年整个流域 TP 负荷进一步增加,且呈恶化趋势。

云蒙湖流域由土地利用方式所造成的 TP 负荷 1986 年为 100.98 t,1995 年为 123.57 t,至 2010 则上升为 144.36 t。25 a 间,非点源污染负荷 TP 增加明显,这种变化趋势与土地利用结构密切相关,耕地虽有少量减少,但随着化肥施用量的增加,非点源磷污染负荷加重。

3.2 各土地利用类型 TP 负荷分析

随着人类的开发利用及土地利用方式的转变,耕地 TP 负荷量由 1986 年的 90.75 t、1995 年的 112.88 t,增加到 2010 年的 132.83 t,TP 增加了 42.08 t,耕地的非点源污染负荷量增加幅度大;林地、草地面积变化较小,其非点源污染总量变化较小;居民用地的非点源污染增加幅度也较大,但由于居民用地面积较小,其非点源污染决定值较小。

由于土地利用类型之间的转换及耕地化肥施用量的增加,不同土地利用类型对 TP 负荷的贡献率(某地类负荷量与相应年份负荷总量的比值)也发生了变化。耕地对 TP 贡献率最大,从 1985 年的 89.50%、1995 年的 91.35%增加到 2010 年的 92.02%;林地、草地对 TP 的贡献率呈减小趋势,林地对 TP 的贡献率 1986 年为 3.16%、1995 年为 2.42%,到 2010 年则为 2.35%,草地对 TP 贡献率 1986 年为 5.92%、1995 年为 5.05%、2010 年 3.66%;居民用地对 TP 的贡献率较小(表 4)。因而,耕地是影响非点源磷污染的主要原因。

3.3 各子流域非点源磷污染时空变化

由于各子流域面积大小不一,难以用负荷量进行衡量,因而,采用负荷强度(单位面积负荷量)进行时空分析。利用 ArcGIS 9.0 将非点源污染负荷分布图和子流域分布图进行叠合统计分析,得到 88 个子流域单位面积非点源磷污染负荷强度分布图(图 1)。

表 4 不同年份各地类 TP 负荷及其贡献率

地类	1986 年		1995 年		2010 年	
	负荷量/t	贡献率/%	负荷量/t	贡献率/%	负荷量/t	贡献率/%
耕地	90.75	89.50	112.88	91.35	132.83	92.02
林地	3.18	3.16	2.99	2.42	3.39	2.35
草地	5.97	5.92	6.24	5.05	5.28	3.66
城镇用地	1.08	1.07	1.46	1.18	2.86	1.98

从图 1 中可以看出,磷污染负荷强度的空间分布发生了明显变化,1986 年 TP 负荷强度较大的子流域

主要分布于流域东部;由于耕地面积和施肥量的增加幅度不同,流域西部污染负荷强度增加幅度较流域东

部大(如子流域 14、16、24),因而,1995 年污染负荷较大的子流域向流域西部扩展;到 2010 年各子流域磷负荷强度进一步增加,TP 负荷强度最大的子流域为 26、35、37,其耕地面积比例分别高达 81.77%,86.37%,88.60%。

从时间变化过程看,各子流域 TP 负荷强度逐年加大,但由于土地利用结构及其变化状况的差异,各

子流域 TP 产出负荷增加的程度不同。总体来看,耕地面积比例高的子流域,产出负荷增加的程度大,如子流域 11、35、36、37,其耕地面积比例都在 75%以上;子流域 18、32、44 变化幅度较小,主要是因为这 3 个子流域以水体为主(水体不考虑),其面积比例都在 40%以上;由于居民用地的扩展,耕地面积减小,子流域 21、22 的 TP 负荷量略有减小。

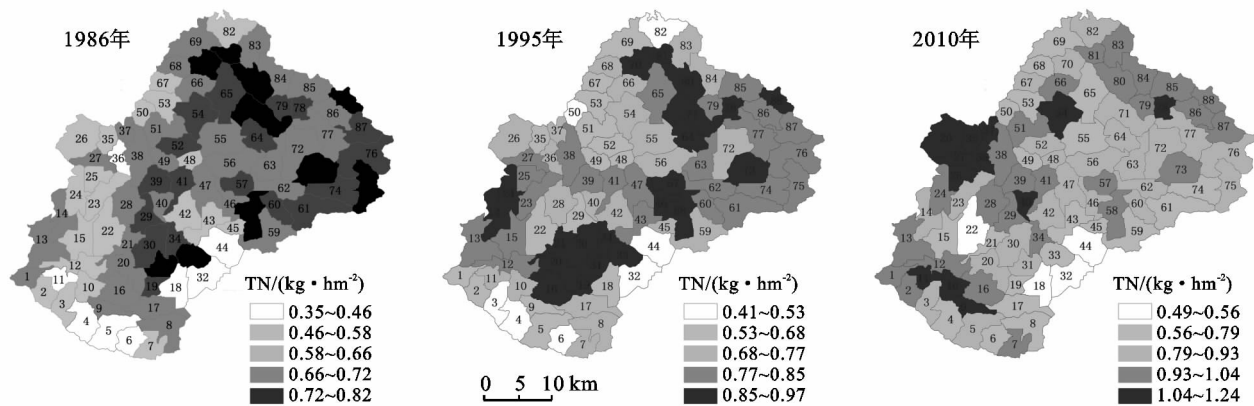


图 1 不同年份 88 个子流域磷污染负荷强度分布

4 结论

流域是研究及治理非点源污染的最佳空间单元。在以往单一尺度流域相关研究的基础上,利用基于观测数据的输出系数模型,对流域—子流域的非点源污染负荷进行动态模拟,可以揭示不同空间单元非点源污染负荷的变化过程,快速识别高风险非点源污染子流域,这为大尺度流域和资料缺乏地区非点源污染变化机理研究提供了新思路,同时也可有针对性地采取治理措施提供科学依据。对云蒙湖流域 1986—2010 年非点源污磷污染的时空变化研究表明:

(1) 近 25 a 间,云蒙湖流域由土地利用所造成的非点源磷污染负荷量明显增加;这种变化趋势与土地利用类型的变化密切相关。TP 高负荷区主要分布于流域的河谷低平地带,主要是由于该区集中了大部分农业耕作区,化肥施用量高。

(2) 由于经济的发展,各土地利用类型之间的转换,不同土地利用类型对 TP 负荷量及 TP 的贡献率也发生了变化。耕地面积呈略减小趋势,但由于耕地化肥施用量的增加,其 TP 负荷量和贡献率均呈增加趋势;林地、草地面积变化较小,其 TP 负荷量变化不明显,但贡献率呈减小趋势;居民用地增加幅度大,但面积总体较小,其 TP 负荷量和贡献率都较小,对流域水质影响较小。

(3) 从子流域看,各子流域 TP 污染负荷强度呈增加趋势,但增加的程度不同,耕地面积比例高的子

流域,TP 负荷强度增加的程度大;TP 污染负荷强度较大的子流域 1986 年主要分布于流域东部,1995 年向流域西部扩展,到 2010 年各子流域磷负荷强度进一步增加。

参考文献:

- [1] Lai D Y F, Lam K C. Phosphorus sorption by sediments in a subtropical constructed wetland receiving storm water runoff [J]. Ecological Engineering, 2009, 35(5): 735-743.
- [2] 马骞,于兴修,刘前进,等. 沂蒙山区不同覆被棕壤理化特征对径流溶解态氮磷输出的影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(7): 1526-1536.
- [3] 方芳,李哲,田光,等. 三峡小江回水区磷素赋存形态季节变化特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2009, 30(12): 3488-3493.
- [4] Jiao P J, Xu D, Wang S L, et al. Phosphorus loss by surface runoff from agricultural field plots with different cropping systems [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 90(1): 23-32.
- [5] 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.
- [6] 黄红艳,高扬,曹杰君,等. 上海市都市农业区域地下水磷素非点源污染特征研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 101-113.
- [7] 李恒鹏,刘晓玫,黄文钰. 太湖流域浙西区不同土地利用类型的面源污染产出[J]. 地理学报, 2004, 59(3): 401-408.

(2) 0—40 cm 内,随高度的增加,输沙量的粒度组成表现为中沙粒基本呈递减趋势,减小的幅度因下垫面的不同而异,细沙粒呈递增趋势。

(4) 三种不同下垫面近地表 0—10 cm 层风沙流结构特征数 S 值均小于 3.8,特征值 λ 均大于 1,这表明三种下垫面均处于风蚀或搬运状态。

参考文献:

- [1] 邹学勇,董光荣. 风沙物理学的发展与展望[J]. 地球科学进展,1993,8(6):44-49.
- [2] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [3] 董治宝. 中国风沙物理研究五十年(I)[J]. 中国沙漠,2005,25(3):293-305.
- [4] 王翔宇,朴东均,丁国栋,等. 流动沙丘风沙流结构的定量研究[J]. 水土保持研究,2008,15(2):36-39.
- [5] 马玉明. 风沙运动学[M]. 呼和浩特:远方出版社,2004.
- [6] 袁东海,王兆骞,陈欣,等. 不同农作措施红壤坡耕地水土流失特征的研究[J]. 水土保持学报,2001,15(4):66-69.
- [7] 水建国,柴锡周,张如良,等. 红壤坡地不同生态模式水土流失规律的研究[J]. 水土保持学报,2001,15(2):33-36.
- [8] 董玉祥,马骏. 风速对海岸沙丘表面风沙流结构影响的实证研究[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(9):179-183.
- [9] 李后强,艾南山. 风沙湍流的间隙性、稳定性及分形特征[J]. 中国沙漠,1993,13(1):11-20.
- [10] 冯大军,倪晋仁,李振山. 风沙流中不同粒径组沙粒的输沙量垂向分布实验研究[J]. 地理学报,2007,62(11):1194-1203.
- [11] 马世威. 风沙流结构的研究[J]. 中国沙漠,1988,8(3):8-22.
- [12] 梁伟,李振,郑勇,等. 延庆县人工植被的防风蚀效应研究[J]. 水土保持研究,2007,14(4):226-228.
- [13] 王旭,李少昆,王克如,等. 沙尘暴期间和田地区主要地表类型土壤风蚀量研究[J]. 水土保持研究,2007,14(6):283-285.
- [14] 张克存,屈建军,俎瑞平,等. 戈壁风沙流结构和风速廓线特征研究[J]. 水土保持研究,2005,12(1):54-58.
- [15] 兹纳门斯基(А. И. ЗНАМЕНСКИЙ). 沙地风蚀过程的实验研究和沙堆防止问题[M]. 杨郁华,译. 北京:科学出版社,1960.
- [16] 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京:科学出版社,1987,38-39.
- [17] 李钢铁,贾玉奎,王永生. 乌兰布和沙漠风沙流结构的研究[J]. 干旱区资源与环境,2004,18(1):276-278.
- [18] 王自龙,赵明,冯向东,等. 民勤绿洲外围不同下垫面条件下风沙流结构的观测研究[J]. 水土保持学报,2009,16(4):72-75.
- [19] 张华,李锋瑞,张铜会,等. 科尔沁沙地不同下垫面风沙流结构与变异特征[J]. 水土保持学报,2002,16(2):20-23.
- [8] 王秀娟,刘瑞民,何孟常. 松辽流域非点源污染 TN 时空变化特征研究[J]. 水土保持研究,2009,16(4):192-202.
- [9] 张亚丽,李怀恩. 土地利用关系法在非点源污染负荷预测中的应用[J]. 中国农学通报,2009,25(17):270-273.
- [10] 张淑荣,陈利顶,傅伯杰. 于桥水库流域农业非点源磷污染控制区划研究[J]. 地理科学,2004,24(2):232-237.
- [11] 韩凤朋,郑纪勇,王云强,等. 黄河支流非点源污染物(N、P)排放量的估算[J]. 环境科学学报,2006,26(11):1893-1899.
- [12] 周慧平,高超,朱晓东. 关键源区识别:农业非点源污染控制方法[J]. 生态学报,2005,25(12):3368-3374.
- [13] 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 modeling approach[J]. Journal of Hydrology,1996,183(3/4):323-349.
- [14] Reckhow K H, Simpson J J. A procedure using modeling and error analysis for prediction of lake phosphorus concentration from land use information[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,1980,37(9):1439-1448.
- [15] 刘瑞民,杨志峰,晓雯,等. 土地利用/覆盖变化对长江上游非点源污染影响研究[J]. 环境科学,2006,27(2):2407-2414.
- [16] 孟晓云,于兴修,泮雪芹. 云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响[J]. 环境科学,2012,33(6):13-18.
- [17] 徐文佳,李天宏,贾振邦,等. 十堰市非点源污染状况及其区域分布特征[J]. 北京大学学报:自然科学版,2010,46(4):667-673.

(上接第 94 页)