

无锡市不同土地利用类型非点源污染负荷变化分析

赵冰雪, 夏敏*, 王雷, 班伟, 姜海

(南京农业大学公共管理学院, 南京 210095)

摘要: 以非点源污染严重的无锡市为研究区, 在 RS 和 GIS 技术的支持下, 采用 SCS 曲线方程和 USLE 方程估算了不同土地利用类型的非点源污染负荷, 进而分析不同土地利用类型变化带来的非点源污染负荷贡献率的变化。结果表明: ①无锡市 2000~2008 年总氮(TN)负荷增幅为 4.75%, 总磷(TP)负荷增幅为 3.28%。②不同土地利用类型对非点源污染负荷总量和单位面积的贡献率存在差异, 农用地和建设用地的污染负荷贡献率均在 90%以上; 从单位面积污染贡献上看, 对 TN 贡献率较大的土地利用类型依次为农村建设用地、农用地及城镇建设用地, 对 TP 贡献率较大的土地利用类型依次为农村建设用地、农用地和林地。③不同土地利用类型对非点源污染负荷的贡献率也在发生变化, 城镇建设用地对 TN 和 TP 的贡献率变化最为突出, 分别上升了 21%和 17.4%; 农村建设用地的 TN 和 TP 贡献率分别下降了 22.3%和 19.9%; 农用地贡献略为减少; 林地、荒地和水域贡献率略为上升。

关键词: 无锡市; 非点源污染; SCS; USLE

中图分类号: X52

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2012)06-0955-06

Changes of non-point pollution loads of different land-use types in Wuxi city

ZHAO Bing-xue, XIA Min, WANG Lei, BAN Wei, JIANG Hai

(School of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095)

Abstract: Supported by RS and GIS technology, non-point source pollution loads of different land use types in Wuxi city, which have problems of serious non-point source pollution, were estimated using SCS (soil conservation service) curve equation and USLE (universal soil loss equation) equation. The changes of contribution rates of different land use types to total non-point source pollution load were analyzed. The results were as follows. Firstly, from year 2000 to 2008, total nitrogen load and total phosphorus load increased 4.75%, 3.28% correspondingly. Secondly, different land use types had different contributions to non-point source pollution load in total and per area. Contribution rates of farmland and construction land were more than 90% in total; while in per area, successively, rural construction land, farmland and urban construction land contributed mostly to total nitrogen load, but rural construction land, farmland and woodland to total phosphorus load. Finally, contribution rates of different land use types to total non-point source pollution load had been changing. Urban construction land was the most outstanding, which contribution rates rose by 21% and 17.4% to the total nitrogen load and total phosphorus load, respectively, while those of rural construction land decreased by 22.3% and 19.9% correspondingly; farmland decreased slightly, and woodland, wasteland and water rose slightly.

Key words: Wuxi city; non-point source pollution; SCS; USLE

非点源污染, 或称面源污染是指溶解态或颗粒态污染物在大面积降水和径流冲刷作用下迁移汇入水体而引起的水体污染, 主要来源包括水土流失、化肥过量施用、城市径流、畜禽养殖和农村的生活污水等^[1]。与点源污染相比, 非点源污染具有来源

广泛以及随机性、污染负荷时空变化幅度大、监测控制和处理困难而复杂等特点。随着工业和生活污染源等点源污染得到有效控制, 非点源污染已成为水体污染的主要因素。我国已有 63.3%的湖泊水体达到富营养化, 其中 50%以上的磷、氮负荷来自农

收稿日期: 2012-02-06

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项经费项目(200811087)和教育部博士点基金(200803071013)共同资助。

作者简介: 赵冰雪, 女, 硕士研究生。E-mail: zhaobingxue302@126.com

* 通讯作者: 夏敏, 女, 副教授。E-mail: xm@njau.edu.cn

业非点源。太湖流域、安徽巢湖、北京密云水库、云南滇池等水域，非点源污染已成为水质恶化的主要原因之一^[2-4]。

无锡市位于太湖流域，是我国经济发展迅速而非点源污染比较严重的地区之一，尤其是2007年太湖流域爆发的大面积“蓝藻”事件，严重影响了当地人们的生产与生活。为此，作者收集了无锡市2000、2005、2008年土地利用现状、土壤类型和降雨量等数据，运用SCS和USLE模型估算出无锡市氮、磷污染负荷，通过比较不同土地利用类型的面积变化并分析非点源污染负荷的变化，找出不同土地利用类型污染负荷变化的原因，以期对无锡市非点源污染的控制及预防提供参考。

1 研究区概况

无锡市地处江苏省南部、太湖之滨，北临长江，南接浙江、安徽两省，西邻常州市，东靠苏州市，西距南京183 km，东距上海128 km，著名的京杭大运河在此交汇。下辖锡山、江阴和宜兴3个县级市，属亚热带季风气候区，多年平均降水量在1 097 mm。地形多为平原，土壤肥沃，物产丰富，是我国著名的“鱼米之乡”。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

选用无锡市2000年、2005年和2008年ETM+遥感数据，通过对遥感数据进行解译和分类，分成农用地、农村建设用地、城镇建设用地、林地、荒地和水域共6种土地利用类型，得到研究区域3年的土地利用类型矢量图层；土壤资料来源于中科院南京土壤所；坡度坡长因子通过比例尺为1:10万的DEM获得；降雨量数据采用当地水利局提供的16个气象站点年均降雨量。另外，本研究主要针对土地利用变化对太湖水污染的影响，而江阴大部分水系都流入长江，对太湖流域产生的影响不大，故研究区域不包括江阴。

2.2 研究方法

一般认为，非点源污染由降雨径流、土壤侵蚀、污染物迁移3个过程组成。其中降雨径流的计算采用SCS(soil conservation service)曲线方程，土壤侵蚀的计算则采用通用土壤流失方程USLE(universal soil loss equation)，这两个方程均由美国土壤保持局提出。其中，USLE方程用于估算农耕地中的溅蚀、片蚀、细沟侵蚀以及灌木林地的水蚀量等，由于该方程全面考虑了影响土壤侵蚀的自然因素且所

需参数较少并易于获取，因此是目前土壤侵蚀预测中广泛使用的方法^[6]。

2.2.1 径流量计算 SCS曲线方程是美国土壤保持局根据3 000多份试验资料制定的计算降雨过程径流深度的经验公式。该公式考虑了下垫面(土壤、植被和人类活动)对径流量的影响，因此被广泛用于非点源污染的研究^[5]。

$$\begin{cases} Q = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} & P \geq 0.2S \\ Q = 0 & P < 0.2S \end{cases}$$

式中， Q 为径流量(mm)； P 为降雨量(mm)； S 为潜在入渗量(mm)。因此径流量 Q 由 P 和 S 决定， P 值由雨量站提供的降雨量样条插值得到， S 值通过一个经验性的无量纲参数 CN 值来推求：

$$S = (25\ 400/CN) - 254$$

式中， S 为潜在入渗量(mm)，是降雨和径流间的最大差值； CN 为径流曲线参数，代表地表产生径流的能力。本文结合研究区土地利用类型、土壤质地等综合条件，确定了6种土地利用类型的 CN 值(表1)，其中A、B、C、D分别代表透水、较透水、较不透水和接近不透水等4种土壤类型。并参照无锡市土壤志等资料规定无锡市农村建设用地的 CN 值取较不透水值(C)、城镇建设用地的 CN 值取接近不透水值(D)，其余用地类型 CN 值均取4个值的平均值，以符合研究区内各土地特征。

表1 土地利用类型 CN 值
Table 1 CN value of land use types

土地利用类型 Landuse types	I	II	III	IV	V	VI
A	69	61	76	38	77	100
B	84	75	85	60	86	100
C	88	82	90	69	91	100
D	92	87	92	78	95	100

注：I、II、III、IV、V、VI分别表示农用地、农村建设用地、城镇建设用地、林地、荒地、水域。下同。

Notes: I, II, III, IV, V and VI respectively expressed agricultural land, rural construction land, urban construction land, forest land, wasteland and waters. The same below.

2.2.2 土壤流失量计算 USLE方程是将影响水土流失的6个因子用连乘的形式表示，表达式为：

$$A = R \times K \times S \times L \times C \times P$$

其中， A 为年土壤流失量； R 为降雨径流因子； K 为土壤可蚀性因子； LS 为坡度坡长因子； C 为植被覆盖与管理因子； P 为水土保持因子。应用USLE模式预测土壤侵蚀的关键是确定方程中各因子指标值。

(1)降雨径流因子 R 。降雨径流因子 R 与降雨量、

降雨强度、历时、雨滴大小以及雨滴下落速度有关, 它反映了降雨对土壤的潜在侵蚀能力。降雨侵蚀力难以测定, 大多用降雨参数, 如雨量、雨强等来估算。本文采用采用福建水土保持试验站和福建农业大学周伏建提出的 R 值计算公式^[6]:

$$R = \sum_{i=1}^{12} (-1.5527 + 0.1792P_i)$$

式中: R 为全年降雨侵蚀力($J \cdot cm \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$); P_i 为月降雨量(mm)。

根据上述方程计算得到年降雨侵蚀因子 R 值,

在 ARC/INFO 中采用样条插值, 生成无锡市年降雨侵蚀力 R 值空间分布图。

(2)土壤可蚀性因子 K 。 K 因子反映土壤对侵蚀的敏感性及降水所产生的径流量与径流速率的大小, 其值大小与土壤质地、土壤有机质含量有关。本文根据南京土壤所提供的研究区土壤类型和有机质含量, 结合吕喜玺等对我国南方主要土壤可能性侵蚀因子 K 值的研究^[7], 确定出无锡市不同土壤类型的可蚀性因子 K 值(表 2), 并以土壤亚类为成图单元, 生成 K 值分布图。

表 2 土壤可蚀性因子 K 值
Table 2 K value of soil erodibility factor

土类 Soil type	亚类 Sub-category	土壤质地 Soil texture	有机质 Organic matter			
			<0.5	<2	<4	<8
水体 Water	水体 Water	水体 Water	0	0	0	\
水稻土 Paddy soil	渗育型水稻土 Infiltration fertility paddy soil	粘性壤土 Sticky loam	0.63	0.56	0.47	\
	潜育型水稻土 Retention paddy soil	粘壤土 Clay loam	0.63	0.56	0.47	\
	脱潜型水稻土 Off latent paddy soil	粘壤土 Clay loam	0.63	0.56	0.47	\
	漂洗型水稻土 Rinse paddy soil	粘壤土 Clay loam	0.63	0.56	0.47	\
沼泽土 Marsh soil	潜育型水稻土 latent paddy soil	粘壤土 Clay loam	0.63	0.56	0.47	0.138
	腐殖质沼泽土 Humus marsh soil	粘壤土 Clay loam	0.63	0.56	0.47	0.138
潮土 Aquic soil	灰潮土 Gray damp soil	粘土 Clay	0.65	0.47	0.29	\
石灰岩土 Limestone soil	棕色石灰岩土	粘土 Clay	0.65	0.47	0.29	0.244
	Brown limestone soil					
紫色岩土 Purple geomaterials	紫色土 Purple soil	砂质粘壤土 Sandy clay loam	0.6	0.56	0.47	0.343
红壤 Red soil	黄红壤 Yellow-red soil	粘土 Clay	0.65	0.47	0.29	\
黄棕壤 Yellow-brown	粗骨黄棕壤 Yellow-brown	砂质粘土 Sandy clay	0.31	0.29	0.27	0.219

(3)坡度坡长因子 LS 。坡长因子 L 指在其他条件相同的情况下, 任意坡长的单位面积土壤流失量与标准坡长单位面积土壤流失量之比; 坡度因子 S 指在其他条件相同的情况下, 任意坡度下单位面积土壤流失量与标准坡度下单位面积土壤流失量之比。本文参考国内外文献研究^[8], 采用施为光提出的 LS 公式进行计算^[9]:

$$LS = \sqrt{0.045L} (65.41\sin^2 \theta + 4.56\sin \theta + 0.065)$$

式中: LS 为坡长坡度因子; L 为坡长(m); θ 是坡度($^\circ$)。

其中, L 是坡面上任意一点沿水流方向到坡底的最大地面坡度在水平面上的投影距离。 θ 的计算则以 DEM 为基础, 通过坡面计算得到, 通过上面的计算公式, 得到 LS 复合因子的栅格图层。

(4)植被覆盖与管理因子 C 。植被覆盖与管理因子是在相同的土壤、地形和降雨条件下, 某一植被覆盖土地的土壤流失总量与同等条件下无管理措施

的休闲地土壤流失总量的比值, 反映了植被对地表的保护作用, C 值介于 0.001~1 之间。在地表完全没有植被保护的情况下, C 值定为 1; 地面完全被植被覆盖, 则 C 值可取为 0。 C 值的大小除与地表覆盖度相关外, 还取决于具体的植被类型、植被高度等, 因此 C 因子值通过遥感解译的植被覆盖度和土地利用类型相结合得到^[10]。

(5)水土保持因子 P 。 P 是指采用水土保持措施后的土壤流失量与自然植被或顺坡种植时的土壤流失量的比值, 介于 0~1 之间 (0 值表示无侵蚀的地区、1 值表示未采取保持措施的地区), 通常的侵蚀控制措施包括: 等高耕作、修梯田等。本文结合无锡市土地利用类型及水土保持措施, 通过参考黄金良在九龙江流域的研究^[6]以及查看 UELE 模型中的 P 值表^[11], 最终确定研究区不同土地利用类型对应的 P 值, 见表 3。

表3 土地利用类型P值及CD值
Table 3 P value and CD value of land use types

项目 Item	土地利用类型 Landuse type					
	I	II	III	IV	V	VI
P值 P value	0.3	1	1	0.8	1	0
溶解态氮浓度 Dissolved N concentration	2.358	4.044	2.902	0.6	1.581	0.182
溶解态磷浓度 Dissolved P concentration	0.301	0.280	0.215	0.039	0.117	0.011

2.2.3 氮磷污染物负荷计算 降雨径流过程中,可溶性化学物质以及以泥沙为主要载体的固态污染物也随着径流进入河体,对水体造成污染,因此非点源污染物主要分为溶解态污染和颗粒态污染 2 大类。溶解态氮、磷指通过径流携带的总氮和总磷,其负荷为径流中含量与径流量的乘积;颗粒态氮、磷的负荷为泥沙中氮、磷的浓度与土壤实际流失量的乘积。其中,溶解态污染负荷的计算采用黄金良、施为光等相关研究的如下公式^[5]:

$$LD = a \cdot CD \cdot Q \cdot TD$$

式中, LD 为溶解态污染物负荷($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); a 为换算常数, 设为 0.001; CD 为径流溶解态污染物浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); Q 为径流量(mm); TD 为迁移系数, 表示

溶解态污染物从地面向流域出口迁移的百分比, 此处仅探讨可溶态污染物的空间分异, 不考虑其迁移, 因此设 TD 为 1。溶解态污染物浓度 CD 值是根据当地监测站点污染数值, 结合相关资料确定^[12], 见表 3。

颗粒态污染物的计算采用如下公式:

$$LS = b \cdot CS \cdot X \cdot TS \cdot SD$$

式中: LS 为颗粒态污染物负荷($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); b 为换算常数, 设为 0.01; CS 为土壤污染物浓度(%); X 为土壤流失量($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$); TS 为污染物富集比; SD 为流域泥沙输移比。本研究仅探讨氮磷空间分异, 未考虑迁移转化过程, 因此污染物富集比泥沙输移比均设为 1。 CS 值根据当地土壤志及南京土壤所提供的资料综合得到, 见表 4。

表4 土壤污染物浓度CS值
Table 4 CS value of soil pollutant concentrations

土壤类型 Soil type	氮浓度/% N concentration	磷浓度/% P concentration	土壤类型 Soil type	氮浓度/% N concentration	磷浓度/% P concentration
水体 Water	0	0	潴育型水稻 Retention paddy	0.158 1	0.099 8
黄棕壤 Yellow-brown	0.150 1	0.038 0	灰潮土 Gray damp soil	0.095 8	0.074 8
潜育型水稻 Latent paddy	0.120 6	0.066 3	沼泽土 Marsh soil	0.069 0	0.066 2
渗育型水稻 Infiltration paddy	0.117 9	0.074 8	黄红壤 Yellow red	0.106 5	0.099 7
漂洗型水稻 Rinsetype paddy	0.134 0	0.082 6	紫色土 Purple soil	0.142 0	0.080 0
脱潜型水稻 Off latent paddy	0.172 9	0.095 4	棕色石灰岩 Brown limestone	0.191 6	0.087 0

3 结果与分析

3.1 土地利用类型变化

本研究通过对无锡市 2000 年、2005 年和 2008 年的 ETM+影像进行解译, 运用 ArcGIS9.3 统计功能得到不同土地利用类型的面积(表 5)。从表 5 中看出, 2000~2008 年, 无锡市土地利用类型发生了明显的变化, 变化的主要趋势是城镇建设用地的不断扩张和农村建设用地的大幅减少, 城镇建设用地的面积比重由 2000 年的 6.3% 增加到 23.7%, 而农村建设用地的面积比重由 40.5% 降低到 25%, 农用地面积也有较大幅度减少, 显示城镇建设用地面积增

加的主要来源是农村建设用地。

3.2 污染负荷变化分析

综合无锡市不同土地利用类型的降雨、土壤、地形、植被、耕作方式和水土保持措施等因素, 利用 SCS 曲线方程和 USLE 通用土壤流失方程, 分别计算出研究区 3 年的径流量和土壤流失量, 并在此基础上计算出非点源氮、磷污染总负荷和单位面积氮、磷负荷。由表 5 可以看出, 无锡市 2000~2008 年非点源污染负荷总量和单位面积污染负荷都有一定的变化。从污染负荷总量来看, TN 负荷和 TP 负荷均呈先增加后减少的趋势, 并在 2005 年达到最大值。这主要由于前期伴随经济的发展, 大量的林地

草地被人们开发利用,导致非点源污染负荷的加重。而随着人们环保意识的增强和国家“退耕还林”等政策的推广,人们逐渐重视对环境的保护,这在一定程度上减少了非点源污染;从单位面积污染负荷变化来看,2000~2008年,除农用地和水域的单位面积氮、磷污染负荷呈持续增加外,其余土地利用

类型的单位面积污染负荷均呈先增加后减少的趋势。农用地的单位面积氮、磷污染负荷增加率分别为15%和22%,水域的单位面积氮、磷污染负荷增加率分别为124%和450%。这与农民大量使用化肥农药和农村生活污水未经处理随意排放,以及水产养殖的增多密切相关。

表 5 2000~2008 年无锡市不同土地利用类型污染负荷变化

Table 5 Changes of pollution loads of different land use types during 2000-2008 in Wuxi city

年份 Year		I	II	III	IV	V	VI	总计 Sum
2000	1	1 117	1 124.6	390.2	443.2	77.2	39.1	3 191.3
	2	3 008.8	5 417.0	561.1	445.1	40.2	5.1	9 477.3
	3	538.8	794.3	60.9	126.3	3.2	0.4	1 523.9
	4	2.78	4.59	3.15	1.10	1.68	0.29	
	5	0.50	0.67	0.34	0.31	0.14	0.02	
2005	1	893.9	955.4	873.5	376.7	61.6	30.2	3 191.3
	2	1 885.0	5 178.3	2 495.9	950.5	84.5	14.2	10 608.4
	3	309.9	796.4	325.9	320.6	20.1	1.0	1 773.9
	4	3.02	5.61	3.87	1.50	2.83	0.30	
	5	0.50	0.86	0.51	0.51	0.68	0.02	
2008	1	836.7	858.2	1 115.5	300.2	54.2	26.5	3 191.3
	2	2 923.4	3 460.4	2 680.4	720.7	94.7	48.1	9 927.6
	3	557.3	509.2	339.2	159.7	8.6	8.2	1 582.2
	4	3.20	5.02	3.86	1.46	2.08	0.65	
	5	0.61	0.74	0.49	0.32	0.19	0.11	

注: 1 表示面积/hm²; 2 表示总氮负荷, 指溶解态氮与颗粒态氮负荷之和, t; 3 表示总磷负荷, 指溶解态磷与颗粒态磷负荷之和, t; 4、5 分别表示单位面积氮、磷负荷, t·hm⁻²。

Notes: one refers to area, hm²; two expressed N load, which refers to the sum of dissolved N and particulate N, t; three refers to P load, which refers to the sum of dissolved P and particulate P, t; four and five respectively refer to per unit area of N and P load, t·hm⁻².

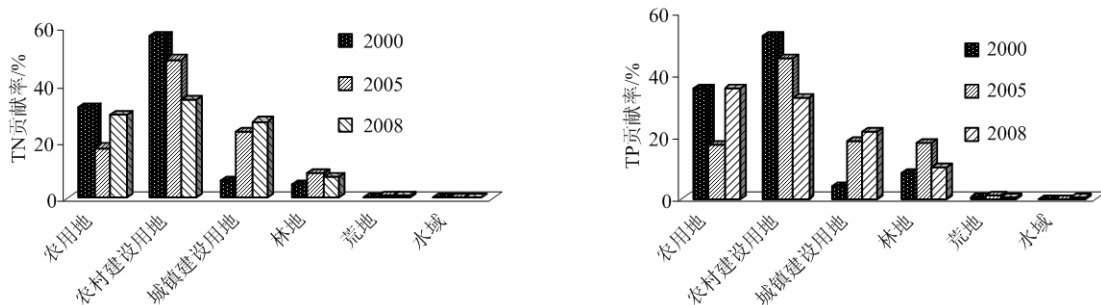


图 1 不同土地利用类型在不同年份的贡献率

Figure 1 Contribution ratio of different landuse types in different years

3.3 不同土地利用类型污染负荷贡献分析

随着社会经济的发展,从2000~2008年,无锡市不同土地利用类型的面积在不断发生变化,因而不同土地利用类型对研究区的TN和TP贡献率也在发生相应的变化^[13],见图1。

2000~2008年数据对比表明:农用地和农村建设用地上对TN的贡献率分别下降了2.3%和22.3%,城镇建设用地的贡献率分别上升了21.1%和2.6%,荒地和水域的贡献率略有增加;土地利用对

TP的贡献率也发生较大的变化,农村建设用地的贡献率由52.1%下降到32.2%,城镇建设用地的贡献率由4%上升到21.4%,农用地的贡献率略有减少,荒地和水域对TP贡献率略有增加。这与城镇建设用地向农用地和农村建设用地扩展,导致地表冲刷加强带来非点源污染负荷量增加有关。由此可见,城市化过程对非点源污染负荷量的变化有很大影响^[14]。

另一方面,不同年份各土地利用类型对不同污染类型的贡献也在发生变化,见图2。2000年对TN

贡献率较大的依次是农村建设用地、农用地及城镇建设用地, 相比而言, 林地、荒地及水域的贡献率较低。对 TP 贡献率较大的依次是农村建设用地、农用地及林地; 2005 年对 TN 贡献率较大的依次是农村建设用地、城镇建设用地及农用地, 对 TP 贡献率较大的依次是农村建设用地、城镇建设用地及林地。2008 年对 TN 贡献率较大的依次是农村建设用地、农用地和城镇建设用地, 对 TP 贡献率较大的依次是农用地、农村建设用地及城镇建设用地。与 2000 年相比, 城镇建设用地对 TN 和 TP 的贡献

率大幅上升, 分别达到 27% 和 21.4%; 农村建设用地对 TN 和 TP 的贡献率下降比较明显, 分别下降到 34.9% 和 32.2%, 这主要与城镇建设用地的扩张和农村建设用地的减少相关。与 2005 年相比, 林地对 TN 和 TP 的贡献率有所降低, 水域对 TN 和 TP 的贡献率略有增加, 这与研究区水产养殖的增多有关。有研究认为鱼塘中投放的饲料仅 13.9% 的氮素和 25.4% 的磷素转化为渔产品, 其余的或沉积于底泥或汇集于水体, 在一定程度上加大了水体富营养化程度^[15]。

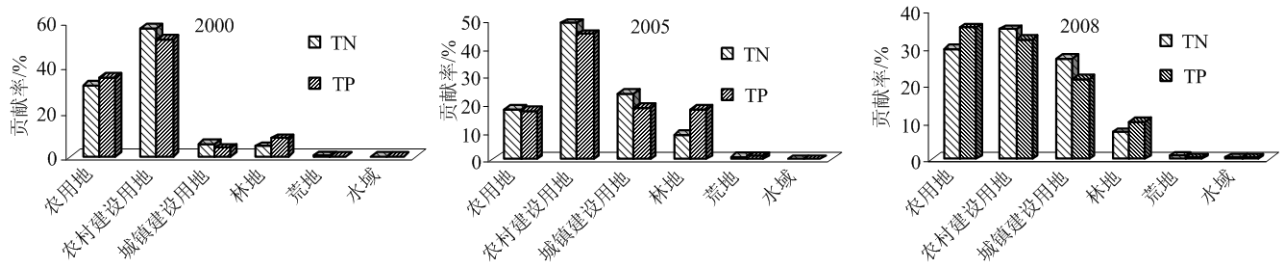


图 2 不同土地利用类型对不同污染类型贡献率

Figure 2 Contribution ratio of different landuse types in the different types of pollution

4 结语

本研究基于 SCS 曲线方程和 USLE 通用土壤流失方程, 对无锡市 2000 年、2005 年和 2008 年 3 年的土地利用变化造成的非点源污染负荷进行了初步估算, 并进一步分析了不同年份下各土地利用类型对非点源污染负荷贡献的差异及变化, 这为大尺度流域和资料缺乏地区的非点源污染估算提供了参考。但研究仍有需要改进的地方, 如遥感数据的精度可能影响解译结果的质量; 另外所采用的模型主要考虑降雨、地形、土壤和土地利用方式对非点源污染负荷的影响, 其他影响因素未加以研究, 可能会影响估算结果的精确程度。这些都是今后研究中需进一步改进之处。

参考文献:

- [1] 张荣保, 姚琪, 计勇, 等. 太湖地区典型小流域非点源污染物流失规律—以宜兴默林小流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(1): 94-98.
- [2] 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.
- [3] 阎伍玖, 王心源. 巢湖流域非点源污染初步研究[J]. 地理科学, 1998, 18(3): 263-267.
- [4] 杨爱玲, 朱颜明. 城市地表饮用水源保护研究进展[J]. 地理科学, 2000, 20(1): 72-77.
- [5] 黄金良, 洪华生, 张珞平, 等. 基于 GIS 的九龙江流域农业非点源氮磷负荷估算研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 866-871.

- [6] 黄金良, 洪华生, 张珞平, 等. 基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 75-79.
- [7] 吕喜玺, 沈荣明. 土壤可蚀性因子 K 值的初步研究[J]. 水土保持学报, 1992(1): 63-70.
- [8] Hickey R, Smith A, Jankowski P. Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO GRID[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 1994, 18(5): 365-380.
- [9] 施为光. 四川省清平水库流域非点源污染负荷计算[J]. 重庆环境科学, 2000, 22(2): 33-36.
- [10] 游松财, 李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算——以江西省泰和县灌溪乡为例[J]. 自然资源学报, 1999, 14(1): 62-68.
- [11] Wischmeier W H. Estimating the soil loss equation's cover and management factor for undisturbed areas[C]// Proceedings of sediment-yield workshop. U. S. Department of Agriculture Sedimentation Laboratory, Oxford, MS, 1972.
- [12] 李恒鹏, 黄文钰, 杨桂山, 等. 太湖地区蠡河流域不同用地类型面源污染特征[J]. 中国环境科学, 2006, 26(2): 243-247.
- [13] 汪朝辉, 陈蓓青, 程学军, 等. 土地利用变化对长阳县非点源污染负荷的影响研究[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(1): 17-21.
- [14] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 城市化对水体非点源污染的影响[J]. 环境科学, 2004, 25(6): 32-39.
- [15] 靳晓莉, 高俊峰, 赵广举. 太湖流域近 20 年社会经济发展对水环境影响及发展趋势[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 298-302.