

基于实测资料的输出系数分析与陕西沔河流域 非点源负荷来源探讨

杜娟, 李怀恩*, 李家科

(西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048)

摘要:根据 2001—2009 年秦渡镇水文监测断面的监测数据,应用平均浓度法计算 NH_4^+-N 、TP 和 COD 的非点源污染负荷量,并与改进的输出系数法估算结果进行对比分析,确定适合该流域的输出系数。将考虑流域输移损失的输出系数得到的非点源污染负荷与基于实测资料的平均浓度法计算结果进行对比可知,相对误差较小,表明各类营养源的输出系数值与流域损失系数值适合沔河流域。应用考虑流域输移损失的输出系数法的负荷计算结果分析了流域内污染物的来源,结果表明:近十年来,耕地和农业人口的贡献最大,其中耕地对沔河流域 TN、 NH_4^+-N 和 TP 非点源负荷的贡献率分别占到 37.87%、37.74%、15.56%,且呈现上升趋势;农业人口对 TN、 NH_4^+-N 、TP 和 COD 非点源负荷的贡献率分别是 40.73%、41.06%、61.19%、21.98%,且呈现上升趋势;牲畜(包括牛、驴、猪、羊等)对 COD 非点源负荷的年均贡献率为 73.49%。由此可见,控制耕地、农业人口以及大牲畜所产生的污染负荷可以有效削减非点源污染。

关键词:非点源污染;输出系数法;实测数据;负荷来源;沔河流域

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)04-0827-11 doi:10.11654/jaes.2013.04.025

Analysis on Export Coefficients Based on Measured Data and Study on the Sources of Non-point Load for Fenghe River Watershed in Shaanxi Province, China

DU Juan, LI Huai-en*, LI Jia-ke

(Key Lab of Northwest Water Resource and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The suitable export coefficients of NH_4^+-N , TP and COD for Fenghe River watershed in Shaanxi Province were determined by comparing the load given by improved export coefficient model with that calculated by the mean concentration method based on measured data at Qinduzhen section from 2001 to 2009. The results showed that the export coefficient model considering the transport lose in watershed had low relative error, less than 15% for COD load, 13% for TP and 14% for NH_4^+-N load. That was to say, the given values of the export coefficients and transport lose parameter were suitable for this watershed. The sources of the non-point pollution in Fenghe River watershed were analyzed with export coefficient model considering the transport lose, and it could be concluded that the domestic pollution of local people and cultivated land has great contribution to non-point pollution, and there was an roughly increasing trend in the last ten years. In detail, the cultivated land accounted for 37.87%, 37.74% and 15.56% of non-point TN, NH_4^+-N and TP load in this watershed respectively, and domestic pollution contributed 40.73%, 41.06%, 61.19% and 21.98% to non-point TN, NH_4^+-N , TP and COD load respectively. In addition, Live-stock breeding produced the non-point load for COD as high as 73.49%. Therefore, the control and management of pollution from cultivated land, domestic sewage and livestock breeding could effectively reduce the output of non-point source load in this watershed.

Keywords: non-point pollution; export coefficient model; measured data; load sources; Fenghe River watershed

收稿日期:2012-09-16

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项河流主题,渭河水污染防治专项技术与示范课题(2009ZX07212-002);国家自然科学基金项目(50909080);陕西省自然科学基金项目(2009JQ7008)

作者简介:杜娟(1987—),女,硕士研究生,主要从事非点源污染与水资源保护研究。E-mail:dujuan3418@163.com

*通信作者:李怀恩 E-mail:yjsb1@xaut.edu.cn

非点源污染(NSP)是指溶解性或非溶解性的污染物从非特定的地域,在降水和径流的冲刷下,通过径流过程汇入受纳水体而引起的污染^[1]。美国60%的水环境污染源于NSP;丹麦270条河流94%的氮负荷、52%的磷负荷是由NSP引起的;荷兰农业NSP造成的总氮、总磷分别占水环境污染总量的60%和45%;2000年中国有10个水资源一级区的总磷和总氮入河量中NSP贡献率分别为68%和65%,大量研究表明氮、磷等污染负荷主要是由NSP造成的^[2]。国外的NSP污染模型有SWAT、HSPF、AnnAGNPS等,这些分布式模型虽然模拟精度较高,但对数据的要求也很高,需要大量详细的水文水质监测数据和流域内气象、地形、土壤等数据,估算成本较高。在国内常用的估算流域NSP污染负荷的方法有输出系数法、径流分割法、平均浓度法、降雨量差值法等,其中输出系数法避开了NSP污染发生和发展的复杂过程,且所需参数少,操作简便易行,又具有一定的精度,适合水文水质资料缺乏的地区以及大尺度流域,因此得到了广泛的应用^[3-4]。应用输出系数法的关键是如何合理确定输出系数,这仍然是需要进一步探讨的问题。本文基于渭河支流沔河流域的水文水质实测资料计算得到NSP污染负荷量,合理确定输出系数,进而应用输出系数法分析沔河流域的非点源污染负荷及其来源与构成,以期为沔河流域的水污染控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

沔河属黄河流域渭河水系,是渭河的一级支流。沔河发源于西安市长安区秦岭北侧,流经西安市长安区、户县、咸阳市秦都区等十余个乡镇,于咸阳北部渔王村入渭河,流域地处东经108°35′~109°09′,北纬33°50′~34°20′,南依秦岭山地,北连渭河平原(图1)。东西宽约49.2 km,南北长约59.5 km,有各级支流21条,流域总面积1386 km²。沔河多年平均年径流量为2.381亿m³,实测最大年径流量为5.38亿m³,实测最小年径流量为0.868亿m³,年际变化大且年内分配也极不均匀^[5]。流域地势总体上为东南高、西北低,南边是呈东西走向的秦岭山脉,北麓与广大平原呈断层接触。本文研究范围是整个沔河流域,水质监测断面分别为太平峪、高冠峪、祥峪、沔峪断面;沔峪口-入渭前的水质监测断面有5个,分别是沔河口、秦渡镇、严家渠、三里桥、漓河入沔断面,监测断面如图2所示,其中秦渡镇断面水文站具有长系列流量资料。



图1 沔河流域地理位置图

Figure 1 Location map of Fenghe River basin

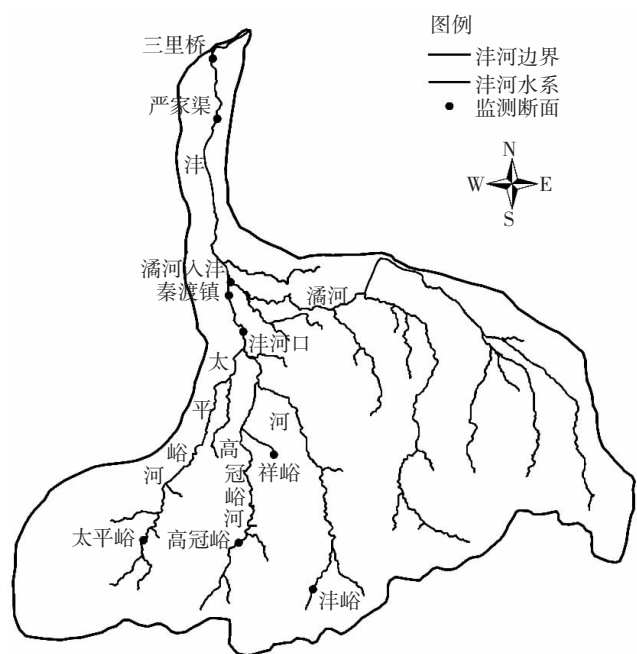


图2 沔河流域水质监测断面图

Figure 2 Water quality monitoring sections in Fenghe watershed

1.2 研究方法

本文基于沔河秦渡镇断面的实测水文水质资料,应用平均浓度法计算NSP污染负荷量,通过与输出系数法的计算结果对比,进行误差分析,合理确定输出系数,进而应用输出系数法分析沔河流域的非点源污染负荷及其来源构成。

1.2.1 输出系数法

20世纪70年代初期,美国、加拿大在研究土地利用-营养负荷-湖泊富营养化关系的过程中,提出并应用了输出系数法。这种方法为人们研究非点源污染提供了一种新的途径。一般表达式为^[6]:

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

式中: L 为各类土地某种污染物的总输出量, $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$; E_i 为第 i 种土地利用类型的该种污染物输出系数, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 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。

在蔡明等^[7]的研究中,对输出系数法进行了改进,增加了降雨影响和流域损失的考虑,鉴于目前已有的降雨资料有限,本研究不考虑降雨的影响,只考虑在产汇流过程中的流域输移损失。研究表明^[8]:流域出口断面处的 NSP 污染负荷量与流域产出的 NSP 污染负荷量之比 λ 就是流域的损失系数,则考虑流域损失的输出系数模型为^[7]:

$$L = \lambda \sum_{i=1}^m E_i A_i \quad (2)$$

其中: $\lambda = 1/(1+R_L) = 1/(1+aq^b)$ (3)

式中: λ 为流域损失系数; R_L 为流域损失量; q 为流域年径流模数; a, b 为参数,由非线性回归法确定。

1.2.2 平均浓度法

平均浓度法^[9]是李怀恩于 2000 年提出的一种简便易用的估算流域 NSP 负荷的方法,它的主要思想是:根据各次降雨径流过程的水量、水质同步监测资料,先计算每次暴雨洪水的各种污染物非点源污染的平均浓度,再以各次暴雨产生的径流量为权重,求出加权平均浓度近似作为地表径流的平均浓度,与地表径流之积为 NSP 污染负荷量。

2 结果与讨论

2.1 输出系数的选择

应用输出系数模型的关键是确定合理的输出系数,常用的方法有查阅文献法、野外监测法和数学统计法^[10]。由于缺乏长系列的监测资料且实验条件不充分,本文采用文献法来初步确定沔河流域污染负荷的输出系数值,考虑流域输移损失后修正系数值,使输出系数法的计算结果更适合流域的实际情况,利用公式(2)估算的结果来分析非点源污染负荷的来源构成。

从沔河流域实际出发,把营养源分为土地利用、牲畜及农业人口 3 大类。为了提高分析精度,将土地利用进一步分为:耕地、草地、林地、城镇用地和未利用地 5 种类型,牲畜又分为大牲畜、猪、羊 3 种类型。

2.1.1 TN 输出系数的分类及确定

参考文献[11-12]的研究结果可知:沔河的耕地情况与文献[12]中相似,故确定耕地 TN 的平均系数

为 $32.88 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。由于研究流域内草地以天然草地为主,基本不施用化肥,故草地 TN 系数采用 $1.578 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[13]。王德连^[14]的研究中林地与研究区域林地结构相似,故确定林地 TN 系数为 $3.27 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[13]。鉴于城镇用地的复杂易变性,对其输出系数取值的研究还很不完善,参考文献[15-17]的研究结果取均值,得城镇用地 TN 输出系数为 $11 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。未利用地(自然地)的 TN 输出系数可以通过研究流域的土壤含氮量和土壤侵蚀模数计算而得:

$$E_N = 10^{-2} SC \quad (4)$$

式中: S 为土壤侵蚀模数, $\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$; C 为土壤中总氮含量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

由文献[12]可知:陕西的土壤平均含氮量为 $0.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,关中地区多年平均侵蚀模数为 $962 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,则研究区的未利用地平均输出系数取值为 $8.56 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

由 Johnes^[18]研究结果知:大牲畜、猪、羊的排泄物中氮含量分别为 $61.10, 4.51, 2.28 \text{ kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,氮的输出比例分别为^[19]16.71%、16.43%和 17.68%,计算得牲畜排泄物输出系数分别为 $10.21, 0.74, 0.40 \text{ kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。根据蔡明等^[19]的研究,人的排泄物中氮的输出系数为 $2.14 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

综上所述,水源区不同土地利用类型、牲畜、农业人口的 TN 输出系数取值如表 1 所示。

2.1.2 NH_4^+-N 输出系数的确定

由于文献法中没有适合研究区域的 NH_4^+-N 负荷输出系数,故根据本课题组的分析结果^[20],取水文分割和平均浓度两种方法的算术平均值得:秦渡镇以上断面 NH_4^+-N 和 TN 非点源负荷的比值为 0.154 8,近似采用此值应用于 TN 的输出系数,得到 NH_4^+-N 的输出系数见表 1。

2.1.3 TP 输出系数的确定

在输出系数中受地域影响最大的是土地利用^[21],而沔河流域土地类型主要为耕地、林地及城镇用地,且耕地的主要作物为小麦和玉米,种植结构较稳定,根据参考文献[22-25]确定总磷的输出系数如表 1。

2.1.4 COD 输出系数的分类及确定

由于研究流域处于我国西北地区,根据文献[25]中西北地区的畜禽养殖 COD 的产污系数,以及刘永锋^[23]和杨维等^[21]的研究,综合得出 COD 污染负荷的系数值如表 1。

2.2 输出系数值的合理性分析

依据沔河秦渡镇水文站断面 2001—2009 年的水质监测数据,应用平均浓度法^[9]计算该断面 NH_4^+-N 、

TP 和 COD 的非点源污染负荷量如表 2 所示。

沔河流域内土地利用面积、牲畜及人口状况如表 3 所示, 其中牲畜和人口状况的数据来源于 2001—2010 年的陕西省西安市统计年鉴; 土地利用数据大多来源于西安市统计年鉴, 部分由沔河土地利用图通过 GIS 的空间统计功能得到。

由表 1 中各类营养源的输出系数值和表 3 中沔河流域的土地利用、牲畜和农业人口数据, 应用公式 (1) 计算得 NH_4^+-N 、TP 和 COD 的非点源污染负荷量, 与表 2 中的 NSP 污染负荷进行对比如表 4, 其中 r 表示相对误差率。

由于表 4 中的输出系数法采用的是公式 (1), 并没有考虑降雨和流域输移损失的影响, 其计算结果均大于平均浓度法计算结果, 具体分析如下:

根据表中 NH_4^+-N 、TP 和 COD 这 3 种污染物的结果对比可以看出: (1) NH_4^+-N 污染负荷在 2004 年误

差偏大为 40.32%, 其余年份的误差在 30% 左右, 这是由于输出系数法 (公式 1) 的结果实际上是流域产污负荷, 而不是到达流域出口断面的 NSP 污染负荷, 即没有考虑流域输移损失等因素的影响, 另外土地利用等营养源数据来自年鉴也存在一定的误差, 故输出系数法的计算结果较平均浓度法的计算结果偏大; (2) TP 污染负荷的相对误差基本在 40% 左右, 除上述原因外, 还由于磷没有氮的化学性质活泼, 水溶性差, 往往易于凝聚而被吸附在颗粒表面, 流失以颗粒态为主; (3) COD 污染负荷的相对误差较大, 在 45% 左右, 原因基本类似。

根据表 1 中选定的输出系数值, 计算得到沔河流域 2001—2009 年产生的 NH_4^+-N 、TP 和 COD 负荷量如表 4 所示。由于流域面积较大, 非点源污染物从产生到流域出口断面存在较大的输移损失, 参考 Behrend 的流域损失公式^[8], 可以得到 NH_4^+-N 的损失

表 1 污染负荷的输出系数分类及取值

Table 1 The classification and value of export coefficients of pollution load

负荷	输出系数 取自	土地利用类型 / $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$					牲畜/ $\text{kg}\cdot\text{头}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$			农业人口/ $\text{kg}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$
		耕地	草地	林地	城镇用地	未利用地	大牲畜	猪	羊	
TN	系数值	32.88	1.58	3.27	11.00	8.56	10.21	0.74	0.40	2.14
NH_4^+-N	系数值	5.21	0.25	0.52	1.74	1.36	1.62	0.12	0.06	0.34
TP	张静 ^[22]	0.90	0.20	0.15	0.24	—	0.22	0.14	0.05	0.11
	刘永锋 ^[23]	1.08	0.46	0.44	1.16	0.42	—	—	—	—
	梁常德 ^[24]	1.80	0.80	0.15	2.30	0.20	—	—	—	—
	文献[25]	—	—	—	—	—	0.16	0.10	0.02	—
	系数值	0.51	0.29	0.09	0.14	0.02	0.12	0.08	0.03	0.12
COD	杨维 ^[21]	19.10	0.44	1.60	14.50	0.80	—	—	—	10.20
	刘永锋 ^[23]	16.58	11.23	16.10	39.05	5.26	—	—	—	—
	文献[25]	—	—	—	—	—	502.11	46.50	15.07	—
	系数值	22.80	10.19	13.40	29.93	4.62	630.11	72.33	19.02	15.87

表 2 沔河秦渡镇断面的非点源污染负荷

Table 2 Pollution statistical of Qinduzhen section

年份	地表径流量/ 亿 m^3	NH_4^+-N		COD		TP	
		浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NSP 负荷量/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NSP 负荷量/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NSP 负荷量/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$
2001	0.87	2.62	588.92	164.85	37 111.35	0.39	87.80
2002	1.80	2.06	577.12	134.18	37 518.62	0.37	103.46
2003	3.55	1.25	535.38	97.19	41 726.99	0.26	111.63
2004	1.25	1.50	494.04	108.10	35 651.16	0.29	95.64
2005	2.54	1.54	519.18	114.49	38 673.02	0.33	110.46
2006	1.46	1.35	539.30	75.62	30 208.54	0.23	91.88
2007	2.09	1.47	469.09	44.93	14 578.48	0.28	88.05
2008	1.33	1.50	448.04	71.76	21 476.99	0.29	86.79
2009	2.29	1.48	469.58	69.88	22 157.00	0.26	82.44

表 3 沔河流域土地面积、牲畜及人口状况
Table 3 The status of land area and livestock and population in Fenghe River basin

年份	土地利用类型/hm ²					牲畜/头			农业人口/人
	耕地	草地	林地	城镇用地	未利用地	大牲畜	猪	羊	
2000	53 144	23 611	58 386	6476	795	46 828	244 763	50 864	791 461
2001	51 731	23 603	58 380	7930	768	46 768	290 000	55 000	791 465
2002	50 144	23 598	58 286	7633	751	45 585	295 652	57 222	794 681
2003	49 457	23 583	58 213	9416	743	46 000	299 000	58 600	798 005
2004	46 634	23 546	58 202	13 298	732	47 067	309 000	59 000	799 100
2005	46 080	23 519	58 191	13 897	725	47 500	315 000	59 600	799 325
2006	45 374	23 513	58 182	14 129	714	48 900	310 000	61 567	799 836
2007	44 780	23 497	58 173	14 253	709	6503	78 463	12 270	799 915
2008	44 536	23 489	58 026	14 559	698	5702	6431	10 010	800 112
2009	44 102	23 476	58 006	14 949	679	4690	—	—	800 149

注:由于年鉴中 2009 年中牲畜的数据不详,故计算时以 2008 年的牲畜数量近似代替。

表 4 沔河流域污染物负荷结果对比
Table 4 The results comparison of pollution load in Fenghe River basin

年份	NH ₄ ⁺ -N			TP			COD		
	平均浓度法/t·a ⁻¹	输出系数法/t·a ⁻¹	r/%	平均浓度法/t·a ⁻¹	输出系数法/t·a ⁻¹	r/%	平均浓度法/t·a ⁻¹	输出系数法/t·a ⁻¹	r/%
2001	588.92	701.79	19.17	87.80	166.70	47.33	37 111.35	66 490.94	44.19
2002	577.12	706.57	22.43	103.46	167.86	38.37	37 518.62	67 506.99	44.42
2003	535.38	704.73	31.63	111.63	168.12	33.60	41 726.99	68 733.43	39.29
2004	494.04	693.23	40.32	95.64	168.13	43.11	35 651.16	69 560.59	48.75
2005	519.18	692.89	33.46	110.46	169.33	34.77	38 673.02	70 394.22	45.06
2006	539.30	691.49	28.22	91.88	170.22	46.02	30 208.54	70 742.14	57.30
2007	469.09	588.38	25.43	88.05	144.96	39.26	14 578.48	25 478.01	42.78
2008	448.04	577.92	28.99	86.79	145.96	40.54	21 476.99	31 498.05	31.81
2009	469.58	574.63	22.37	82.44	147.07	43.95	22 157.00	31 651.68	30.00

系数与年径流模数之间的关系为:

$$\lambda=1/(1+0.989\ 4q^{0.324\ 9})\tag{5}$$

TP 的损失系数与年径流模数之间的关系为:

$$\lambda=1/(1+0.156\ 9q^{-0.311\ 2})\tag{6}$$

COD 的损失系数与年径流模数之间的关系为:

$$\lambda=1/(1+1.472\ 5q^{0.137\ 2})\tag{7}$$

应用公式(5)、(6)、(7) 分别求出 NH₄⁺-N、TP 和 COD 各年的流域损失系数 λ 如表 5 所示。

由表 5 的 NH₄⁺-N、TP 和 COD 流域损失系数 λ,应用公式(2)进行计算,与表 2 中平均浓度法结果的对比见表 6。据对比结果可知,相对误差基本不超过±15%,在可接受范围内^[1]。

通过考虑流域损失的输出系数法计算结果与平均浓度法计算结果对比,可得出如下结论:

(1)NH₄⁺-N 负荷在 2001、2002、2006—2009 年的相对误差较小,在 8%以内,2003 年和 2005 年的相对误差

表 5 沔河流域损失系数 λ

Table 5 The loss coefficient λ of Fenghe River basin

年份	径流模数 q/ m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²	λ		
		NH ₄ ⁺ -N	TP	COD
2001	0.004 9	0.850 7	0.548 8	0.585 0
2002	0.010 1	0.818 1	0.604 0	0.560 6
2003	0.020 0	0.782 7	0.653 6	0.537 3
2004	0.007 0	0.835 3	0.576 2	0.573 0
2005	0.014 2	0.801 1	0.629 0	0.549 0
2006	0.008 2	0.828 2	0.588 0	0.567 8
2007	0.011 7	0.810 9	0.614 9	0.555 6
2008	0.007 4	0.832 7	0.580 6	0.571 1
2009	0.012 8	0.806 4	0.621 5	0.552 6

在 10 %左右,只有 2004 年的误差偏大(但也在 14%以内),表明在考虑了流域的输移损失后,输出系数法的计算结果与平均浓度法计算结果吻合度较高。

(2)TP 负荷在 2001、2004、2006、2009 年这 4 年

中的相对误差较大,但均在 15%以内,其余年份的误差在 8%左右,吻合度较高。

(3)COD 的 NSP 负荷量在 2004 年和 2006 年的相对误差较大,但也在 15%左右,其余年份的相对误差均在 8%以内,吻合度较高。

根据表 6 及对比分析结果可知:考虑流域损失后的输出系数法的计算结果是合理的;本文给出的各类营养源的输出系数值与流域损失系数值适合研究区域。所以,可以应用考虑流域输移损失的输出系数法负荷计算结果来分析研究区域内污染物的来源,从而对沔河流域非点源污染的控制提出合理建议,采取相应的措施。

2.3 流域非点源污染负荷估算与来源构成分析

由表 1 中流域的各类输出系数值与表 3 中沔河流域土地利用、牲畜和农业人口数据,应用公式(2)计算流域 TN 非点源负荷如表 7 所示, NH_4^+-N 非点源负

荷如表 8 所示,TP 非点源负荷如表 9 所示,COD 非点源负荷如表 10 所示。

为了直观地说明 TN 负荷的各类来源占 NSP 总负荷的比重,绘制各种来源的柱状图、饼图如图 3、图 4。

NH_4^+-N 负荷的各项来源占 NSP 总负荷比重的柱状图和饼图如图 5、图 6。

由表 7 和图 3、图 4 可知,2000—2009 年间,沔河流域非点源 TN 负荷总体上呈现下降趋势。由表 8 和图 5、图 6 可知,流域非点源 NH_4^+-N 负荷产出趋势与 TN 一致,这 9 年期间 NH_4^+-N 非点源污染负荷量总体呈下降趋势,说明在此期间的各种控制措施都已奏效,并取得良好的效果。但是农业人口和耕地生活污染对非点源 TN、 NH_4^+-N 的贡献率较大,其中农业人口和耕地对 TN 负荷的年均贡献分别为 40.73%、37.87%,所占比例最大(蔡明^[10],李怀恩^[12]研究也认为

表 6 沔河流域修正系数后污染物负荷结果对比

Table 6 The results comparison which is added correction coefficient to the pollution load in Fenghe River basin

年份	NH_4^+-N			TP			COD		
	平均浓度法/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	输出系数法/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	r/%	平均浓度法/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	输出系数法/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	r/%	平均浓度法/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	输出系数法/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	r/%
2001	588.92	589.51	0.10	87.80	101.85	13.80	37 111.35	40 160.53	7.59
2002	577.12	593.52	2.84	103.46	107.60	3.85	37 518.62	40 774.22	7.98
2003	535.38	591.97	10.57	111.63	113.76	1.88	41 726.99	41 784.99	0.14
2004	494.04	562.32	13.82	95.64	107.77	11.26	35 651.16	42 014.59	15.15
2005	519.18	582.02	12.10	110.46	113.54	2.71	38 673.02	42 518.11	9.04
2006	539.30	580.85	7.70	91.88	108.01	14.94	30 208.54	35 728.25	15.45
2007	469.09	494.24	5.36	88.05	92.92	5.23	14 578.48	15 388.72	5.27
2008	448.04	485.45	8.35	86.79	93.56	7.23	21 476.99	21 496.82	0.09
2009	469.58	482.69	2.79	82.44	94.27	12.55	22 157.00	22 166.61	0.04

表 7 沔河流域非点源 TN 负荷量($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)

Table 7 TN load of non-point source in Fenghe River basin($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)

年份	土地利用类型					牲畜			农业人口	总量
	耕地	草地	林地	城镇用地	未利用地	大牲畜	猪	羊		
2000	1 747.37	37.07	190.92	71.24	6.81	478.11	181.12	20.35	1 693.73	4 426.72
2001	1 700.92	37.06	190.90	87.23	6.57	477.50	214.60	22.00	1 693.74	4 430.52
2002	1 648.73	37.05	190.60	83.96	6.43	465.42	218.78	22.89	1 700.62	4 374.48
2003	1 626.15	37.03	190.36	103.58	6.36	469.66	221.26	23.44	1 707.73	4 385.55
2004	1 533.33	36.97	190.32	146.28	6.27	480.55	228.66	23.60	1 710.07	4 356.05
2005	1 515.11	36.92	190.28	152.87	6.21	484.98	233.10	23.84	1 710.56	4 353.86
2006	1 491.90	36.92	190.26	155.42	6.11	499.27	229.40	24.63	1 711.65	4 345.54
2007	1 472.37	36.89	190.23	156.78	6.07	66.40	58.06	4.91	1 711.82	3 703.52
2008	1 464.34	36.88	189.75	160.15	5.97	58.22	4.76	4.00	1 712.24	3 636.31
2009	1 450.07	36.86	189.68	164.44	5.81	47.88	3.51	3.94	1 712.32	3 614.52
年平均	1 565.03	36.96	190.33	128.19	6.26	352.80	159.33	17.36	1 706.45	4 162.71
占年均比例	37.87%	0.87%	4.48%	2.86%	0.15%	8.62%	4.01%	0.41%	40.73%	100.00%

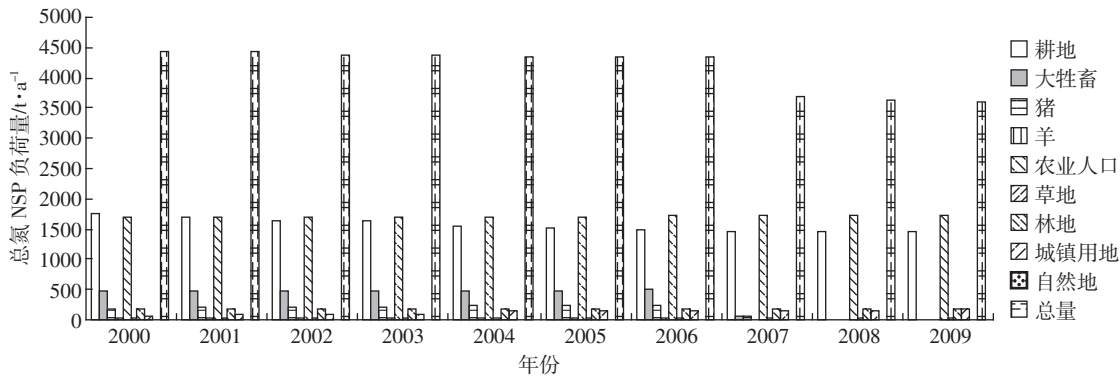


图 3 总氮负荷量柱状比例图
Figure 3 The histogram chart of TN load

农业人口和耕地所贡献的负荷量占的比例最大),应作为非点源污染控制的关键要素。农业人口所产生的 TN 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 负荷呈逐年上升趋势,主要是由于农业人口的数量在不断上升,所以同时还要加大对农业人口污染的控制力度。根据沔河流域 1986—2001 年 16 年的化肥施用量调查资料显示:化肥施用量约 $3.5\text{ 万 t}\cdot\text{a}^{-1}$,其中能被利用的氮、磷只是一少部分:施入土壤中的氮素只有 30%~40%能被作物利用,约 20%被作物的根、茎及土壤微生物固定在土壤中,而 40%~50%随水体流失或分解进入空气中,大部分氮、磷污染物随着耕地的水土流失进入河川。因此,流域农田化肥污染应作为非点源重点控制的对象。

绘制 TP 负荷的各类非点源比重柱状图和饼图如图 7、图 8。

由表 9 和图 7、图 8 可知:2000—2009 年期间,沔河流域非点源 TP 负荷量基本呈下降趋势,这是由于

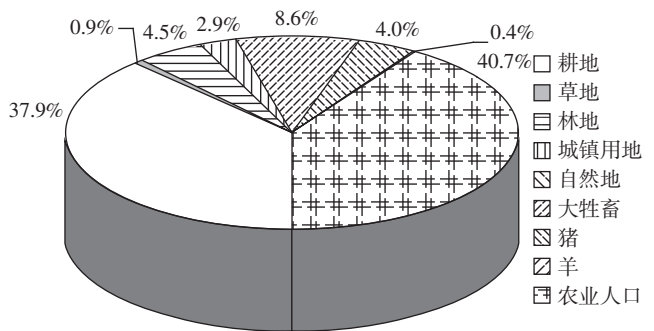


图 4 2000—2009 年均总氮负荷饼状比例图
Figure 4 The pie chart of TN load in 2000—2009

对 TP 贡献较大的耕地、农业人口和牲畜的数量逐年下降,故总量呈现下降。其中,农业人口和耕地所占年均比例最大,分别为 61.19%、15.56%,且结果显示农业人口所产生的 TP 负荷量呈逐年上升趋势。这主要是由于农业人口的数量不断上升,故应加大对农业人

表 8 沔河流域非点源 $\text{NH}_4\text{-N}$ 负荷量($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)

Table 8 $\text{NH}_4\text{-N}$ load of non-point source in Fenghe River basin($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)

年份	土地利用类型					牲畜			农业人口	总量
	耕地	草地	林地	城镇用地	未利用地	大牲畜	猪	羊		
2000	232.50	4.93	25.40	9.48	0.91	63.62	24.10	2.71	225.36	589.00
2001	226.32	4.93	25.40	11.61	0.87	63.53	28.55	2.93	225.36	589.51
2002	228.12	4.93	25.36	11.17	0.86	64.64	29.11	3.05	226.28	593.52
2003	220.74	4.93	25.33	13.78	0.85	66.57	29.44	3.12	227.22	591.97
2004	201.02	4.92	25.32	15.46	0.83	64.66	30.42	3.14	227.54	562.32
2005	201.59	4.91	25.32	20.34	0.83	67.25	31.02	3.17	227.60	582.02
2006	198.51	4.91	25.31	21.41	0.81	68.35	30.52	3.28	227.75	580.85
2007	195.91	4.91	25.31	22.32	0.81	8.83	7.73	0.65	227.77	494.24
2008	194.84	4.91	25.25	22.92	0.79	7.75	0.63	0.53	227.82	485.45
2009	192.94	4.90	25.24	23.64	0.77	6.37	0.47	0.53	227.83	482.69
年平均	209.55	4.92	25.32	17.61	0.83	48.36	21.20	2.31	227.05	557.16
占年均比例	37.74%	0.85%	4.44%	2.86%	0.15%	8.59%	3.89%	0.42%	41.06%	100.00%

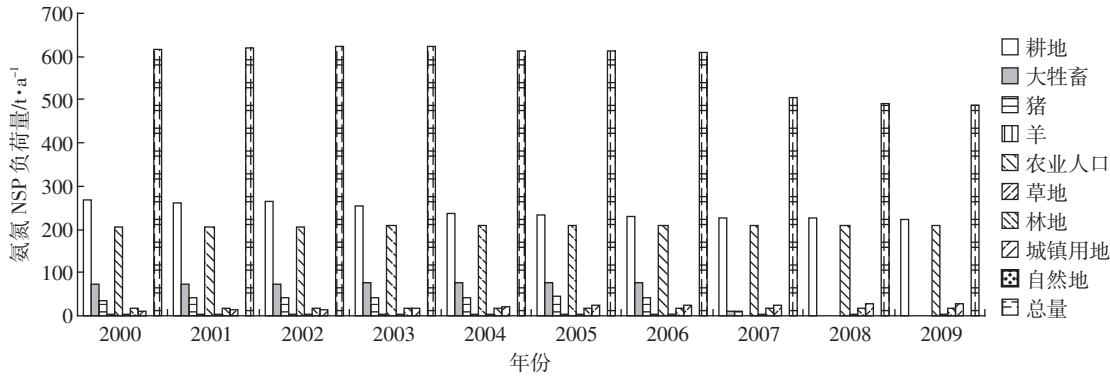


图 5 氨氮负荷柱状比例图

Figure 5 The histogram chart of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ load

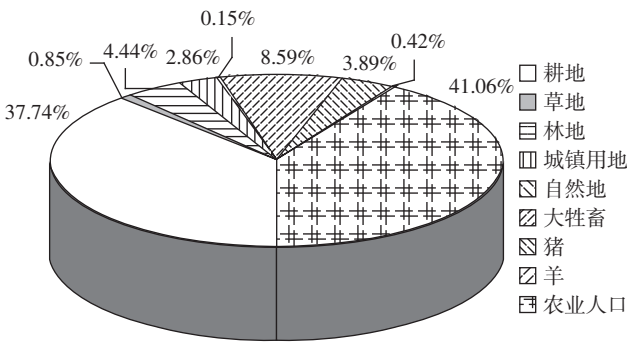


图 6 2000—2009 年均氨氮负荷饼状比例图

Figure 6 The pie chart of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ load in 2000—2009

口产污的控制力度。

根据各类 COD 负荷的来源占 NSP 负荷比重,绘制柱状图和饼图如图 9、图 10。

由表 10 和图 9、图 10 可知:2000—2006 年期间,流域非点源 COD 负荷量总体呈现上升趋势,这是由于

对 COD 负荷的贡献中所占比例较大的是大牲畜、猪和羊,而牲畜的数量除 2000—2001 年略微下降以外,2001—2006 年都是呈现上升趋势,且贡献率最大的大牲畜数量上升幅度最快,故总体呈现上升。2006—2009 年间,整体呈下降趋势,是由于牲畜的数量下降导致所产生的 COD 负荷量下降,虽然其中农业人口的数量一直在上升,且农业人口对 COD 负荷的贡献也是不容忽视的。但从总体来看,农业人口上升的幅度不能与牲畜数量下降的幅度相抵消,故总体下降。所以单从 COD 负荷产出分析还需控制牲畜的产污排放,而沔河流域范围内牲畜养殖是一项收入,不能直接削减数量,可在污染负荷产生后治理再排放,另外控制农业人口所带来的污染负荷也是不容忽视的。

3 结论

(1)根据沔河秦渡镇断面的实测数据,应用平均

表 9 沔河流域非点源 TP 负荷量($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)

Table 9 TP load of non-point source in Fenghe River basin($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)

年份	土地利用类型					牲畜			农业人口	总量
	耕地	草地	林地	城镇用地	未利用地	大牲畜	猪	羊		
2000	17.48	4.40	3.20	0.57	0.01	3.73	12.67	0.84	61.94	104.83
2001	16.01	4.40	3.20	0.70	0.01	3.72	15.01	0.90	61.94	101.85
2002	17.15	4.40	3.19	0.67	0.01	3.79	15.31	0.94	62.19	107.60
2003	16.59	4.39	3.19	0.83	0.01	3.90	15.48	0.96	62.45	113.76
2004	15.66	4.39	3.19	1.08	0.01	3.91	16.00	0.97	62.61	107.77
2005	15.48	4.38	3.19	1.13	0.01	3.94	16.31	0.98	63.16	113.54
2006	15.41	4.38	3.19	1.15	0.01	4.01	16.05	1.01	63.95	108.01
2007	15.38	4.38	3.19	1.16	0.01	0.52	4.06	0.20	64.06	92.92
2008	15.34	4.38	3.18	1.19	0.01	0.52	4.06	0.20	64.73	93.56
2009	15.29	4.37	3.18	1.21	0.01	0.52	4.06	0.20	65.48	94.27
年平均	16.08	4.39	3.19	0.97	0.01	2.85	11.90	0.72	63.25	103.37
占年均比例	15.56%	4.24%	3.09%	0.94%	0.01%	2.76%	11.51%	0.70%	61.19%	100.00%

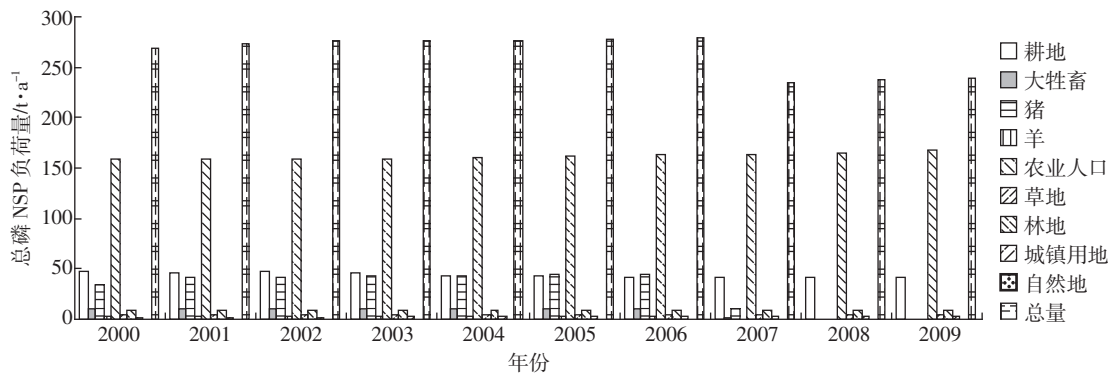


图 7 总磷负荷柱状比例图
Figure 7 The histogram chart of TP load

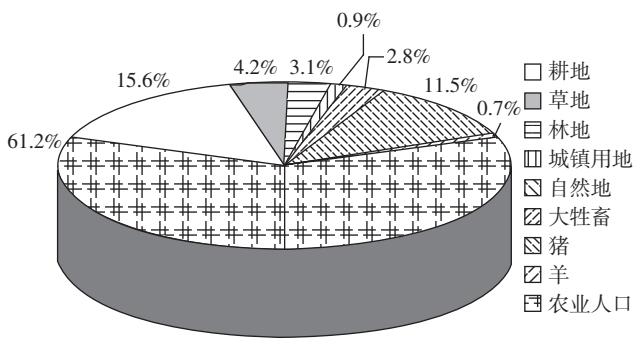


图 8 2000—2009 年均总磷负荷饼状比例图
Figure 8 The pie chart of TP load in 2000—2009

浓度法计算 NSP 污染负荷量, 对比分析修正后的输出系数法计算结果可知: 2001—2009 年 COD 污染负荷量与平均浓度法计算结果的相对误差除个别年份在 15% 左右外, 其余均在 8% 以内; $\text{NH}_4\text{-N}$ 污染负荷的相对误差均在 14% 以内; TP 污染负荷除个别年份

外相对误差在 10% 左右。这表明考虑流域损失后的输出系数法的计算结果是合理的, 本文给出的各类营养源的输出系数值与流域损失系数值适合沔河流域。

(2)应用考虑流域输移损失的输出系数法负荷计算结果, 对沔河流域污染物的来源进行了分析, 结合各表知: 2000—2009 年期间, 沔河流域 TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 TP 非点源污染负荷量总体上呈现下降趋势, 但是耕地和农业人口的贡献率相对较高, 耕地对 TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 TP 非点源负荷的年均贡献分别为 37.87%、37.74%、15.56%; 农业人口对 TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 非点源负荷的年均贡献分别为 40.73%、41.06%, 农业人口对 TP 的 NSP 负荷贡献最大为 61.19%, 故应加大对农田化肥污染和农业人口生活污染的控制管理措施。COD 的负荷产出中贡献最大的是牲畜和农业人口, 其中大牲畜 (包括牛、驴、骡等) 和猪对 COD 的年均贡献率分别是 47.28%、24.37%, 农业人口的 NSP 年均贡献为

表 10 沔河流域非点源 COD 负荷量($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)
Table 10 COD load of non-point source in Fenghe River basin ($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)

年份	土地利用类型					牲畜			农业人口	总量
	耕地	草地	林地	城镇用地	未利用地	大牲畜	猪	羊		
2000	731.86	145.37	472.38	117.05	2.22	17 822.00	10 693.48	584.30	7 584.14	38 152.80
2001	712.40	145.32	472.33	143.33	2.14	17 799.17	12 669.85	631.81	7 584.18	40 160.53
2002	718.09	145.29	471.57	137.96	2.09	18 110.11	12 916.78	657.34	7 615.00	40 774.22
2003	694.85	145.20	470.98	170.19	2.07	18 648.63	13 063.05	673.17	7 646.85	41 784.99
2004	655.98	144.97	470.89	222.28	2.04	18 674.13	13 499.94	677.76	7 666.60	42 014.59
2005	648.39	144.82	470.82	232.96	2.02	18 838.92	13 762.08	684.65	7 733.44	42 518.11
2006	645.51	144.77	470.73	237.30	1.99	19 147.20	13 543.63	707.25	7 829.88	35 728.25
2007	644.22	144.67	470.65	239.54	1.98	2 474.94	3 427.98	140.95	7 843.79	15 388.72
2008	642.29	144.62	469.46	245.07	1.95	6 218.62	9 188.80	479.02	7 926.02	21 496.82
2009	640.39	144.54	469.30	248.51	1.89	6 218.62	9 188.80	479.02	8 017.57	22 166.61
年平均	673.40	144.96	470.91	199.42	2.04	14 395.23	11 195.44	571.53	7 744.75	35 397.67
占年均比例	2.33%	0.32%	1.47%	0.40%	0.01%	47.28%	24.37%	1.84%	21.98%	100.00%

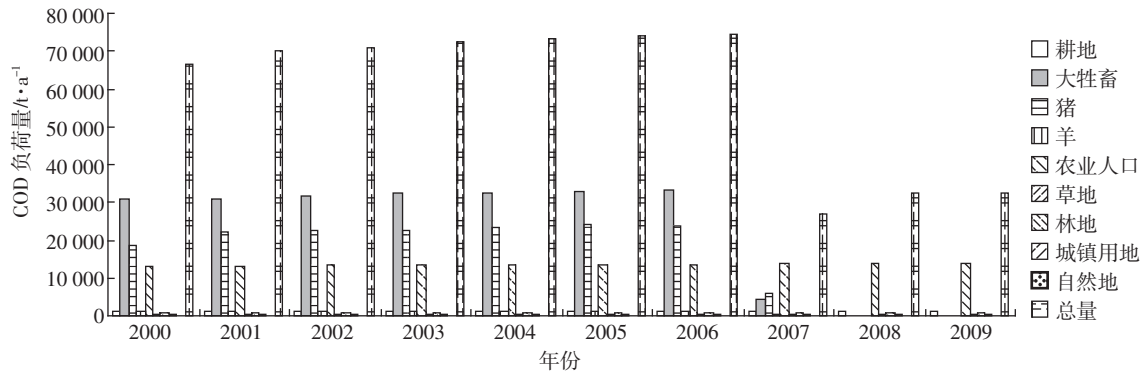


图9 COD 负荷柱状比例图

Figure 9 The histogram chart of COD load

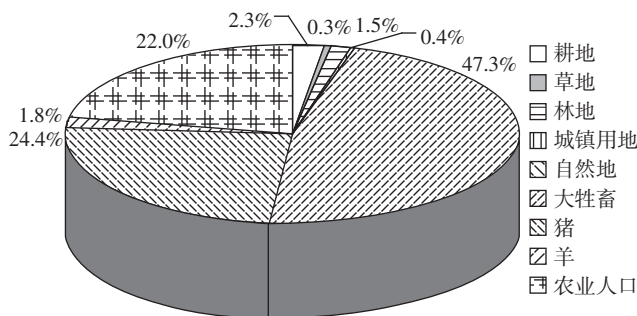


图10 2000—2009 年均 COD 负荷饼状比例图

Figure 10 The pie chart of COD load in 2000—2009

21.98%。故应加大对牲畜养殖污染的控制管理力度。

参考文献:

- [1] 郝芳华, 程红光, 杨胜天. 非点源污染模型—理论方法与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 10.
HAO Fang-hua, CHENG Hong-guang, YANG Sheng-tian. Non-point source pollution model—method and application[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006: 10.
- [2] 周怀东, 彭文启. 水污染与水环境修复[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 7.
ZHOU Huai-dong, PENG Wen-qi. Water pollution and environmental restoration[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 7.
- [3] 毕雪, 王晓媛. 基于输出系数模型的洞庭湖流域面源污染分析[J]. 人民长江, 2012, 43(11): 74–77.
BI Xue, WANG Xiao-yuan. Analysis of non-point source pollution load in Dongting Lake Watershed based on export coefficient model[J]. Yangtze River, 2012, 43(11): 74–77.
- [4] 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.
LIU Ya-qiong, YANG Yu-lin, LI Fa-hu. Estimation of pollution loads from agricultural nonpoint sources in Beijing region based on export coefficient modeling approach[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(7): 7–12.
- [5] 朱记伟, 雒望余, 刘建林. 沔干河生态治理的必要性研究[J]. 新西

部, 2009(22): 63.

ZHU Ji-wei, LUO Wang-yu, LIU Jian-lin. The necessity research of ecological management on Fenghe main stream[J]. New West, 2009(22): 63.

- [6] Thornton J A. Assessment and control of non-point source pollution of aquatic ecosystems: A practical approach[M]. Pearl River, 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.
CAI Ming, LI Huai-en, ZHUANG Yong-tao, et al. Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(7): 40–45.
- [8] Behrend H. Inventories of point and diffuse sources and estimated nutrient loads: A comparison for different river basins in Central Europe[J]. Water Science and Technology, 1996, 33(4–5): 99–107.
- [9] 李怀恩. 估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用[J]. 环境科学学报, 2000, 20(4): 397–400.
LI Huai-en. Mean concentration method for estimation of nonpoint source load and its application[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(4): 397–400.
- [10] 李怀恩, 庄咏涛. 预测非点源营养负荷的输出系数法研究进展与应用[J]. 西安理工大学学报, 2003, 19(4): 307–312.
LI Huai-en, ZHUANG Yong-tao. The export coefficient modeling approach for load prediction of nutrient from nonpoint source and its application[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2003, 19(4): 307–312.
- [11] 李世清, 高亚军, 杜建军, 等. 连续施用氮肥对旱地土壤氮素状况的影响[J]. 干旱地区农业研究, 1999, 17(3): 28–34.
LI Shi-qing, GAO Ya-jun, DU Jian-jun, et al. Continuous application of nitrogen fertilizer on upland soil nitrogen status[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1999, 17(3): 28–34.
- [12] 李怀恩, 王莉, 史淑娟. 南水北调中线陕西水源区非点源总氮负荷估算[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2010, 40(3): 540–544.
LI Huai-en, WANG Li, SHI Shu-juan. Estimation of total nitrogen load from non-point sources in Shaanxi Province water source area of the central line of South-North Water Diversion Project[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2010, 40(3): 540–544.

- [13] 丁晓雯, 沈珍瑶, 刘瑞民. 长江上游非点源氮素负荷时空变化特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 836-841.
- DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao, LIU Rui-min. Temporal-spatial changes of non-point source nitrogen in upper reach of Yangtze River Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 836-841.
- [14] 王德连. 秦岭火地塘森林集水区径流及水质特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004: 30-33.
- WANG De-lian. Studies on runoff and its water quality in the forestry watershed of Huoditang in Qinling Mountain[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2004: 30-33.
- [15] 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: 323-349.
- [16] Charles R Frink. Estimating nutrient exports to estuaries[J]. *Journal of Environment Quality*, 1991, 20: 717-724.
- [17] 卞有生. 生态农业中废弃物的处理与再生利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- BIAN You-sheng. Ecological agriculture in waste disposal and recycling[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [18] Johnes P J, Heathwaite A L. Modelling the impact of land use change on water quality in agriculture catchments[J]. *Hydrological Processes*, 1997(1): 269-286.
- [19] Cai Ming, Li Huai-en, Yoji Kawakami. Rainfall deduction method for estimating non-point source pollution load for watershed[J]. *Mem Fac Eng Fukui Univ*, 2004, 52(1): 23-28.
- [20] 李家科, 李怀恩, 董雯, 等. 渭河关中段典型支流非点源污染监测与负荷估算[J]. 环境科学学报, 2011, 31(7): 1470-1478.
- LI Jia-ke, LI Huai-en, DONG Wen, et al. Monitoring and load estimation of non-point source pollution on typical tributaries in the Guanzhong reach of the Weihe River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(7): 1470-1478.
- [21] 杨维, 杨肖肖, 吴燕萍, 等. 基于输出系数法核定双台子河非点源污染负荷[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(2): 338-343.
- YANG Wei, YANG Xiao-xiao, WU Yan-ping, et al. Based on export coefficient theory in simulating pollution load of non-point source of Shuangtaizi River [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University Natural Science*, 2012, 28(2): 338-343.
- [22] 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.
- ZHANG Jing, HE Jun-shi, ZHOU Fei, et al. Estimation and evaluation of non-point source pollution in the Hunhe River Basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2011, 9(6): 69-73.
- [23] 刘永锋. 流溪河流域非点源污染负荷变化分析[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2012, 12(3): 54-58.
- LIU Yong-feng. Assessment of non-point source pollution in Liuxi River Watershed[J]. *Journal of Langfang Teachers*, 2012, 12(3): 54-58.
- [24] 梁常德, 龙天渝, 李继承, 等. 三峡库区非点源氮磷负荷研究[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 26-30.
- LIANG Chang-de, LONG Tian-yu, LI Ji-cheng, et al. Importation loads of non-point source nitrogen and phosphorus in the Three Gorges Reservoir[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(1): 26-30.
- [25] 第一次全国污染源普查一畜禽养殖业源产排污系数手册[M]. 2010.
- The first national census of pollution sources-livestock and poultry industry source production sewage coefficient Manual[M]. 2010.