

海河流域种植业非点源污染负荷量估算

朱梅¹, 吴敬学¹, 张希三²

(1. 中国农业科学院农业经济与发展研究所, 北京 100081 2. 水利部天津勘测设计院, 天津 300222)

摘要: 建立种植业输出系数模型, 从省级行政区和水资源三级区两个层面分别估算了 2007 年海河流域地表径流和地下淋溶两种方式总氮和总磷的流失量及流失比例。2007 年, 全流域地表径流总氮流失量为 51 966 t, 总磷为 7 976 t。从各省来看, 河北省所占比例最大, 总氮流失量占 57%, 总磷占 58%; 从三级区来看, 徒骇马颊河平原和黑龙港及运东平原所占比例最大, 分别占总氮流失量的 20% 和 15%, 总磷流失量的 20% 和 16%。全流域地下淋溶总氮流失量为 195 875 t, 总磷为 140 t。从各省来看, 河北省所占比例也是最大, 总氮流失量占 55%, 总磷占 53%; 从三级区来看, 徒骇马颊河平原和黑龙港及运东平原所占比例也是最大, 分别占总氮流失量的 19% 和 13%。

关键词: 海河流域 种植业 非点源污染负荷量

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2010)10-1907-09

Estimation on Non-point Source Pollution Loads of Crop Farming in Hai Basin

ZHU Mei¹, WU Jing-xue¹, ZHANG Xi-san²

(1. Institute of Agricultural Economics and Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Tianjin Survey & Design Institute, Ministry of Water Resources, Tianjin 300222, China)

Abstract: Chemical fertilizer applied in crop farming is one of the main sources of agricultural non-point source (NPS) pollution. There are two patterns of chemical fertilizer NPS pollution, one is polluted by surface runoff, and the other is polluted by underground leaching. First, we divided the whole river basin into fifteen water districts according to its water system and landform. Then we estimated the NPS loads by way of surface runoff and underground leaching on the basis of each county. Finally we added up the NPS loads of all counties in each water district and each province respectively. By setting up and applying Export Coefficient Modeling approach for crop farming, the thesis estimated TN and TP loads by means of surface runoff and underground leaching in Hai Basin on the basis of each province and water district. Varying export coefficient was adopted according to different landform and precipitation. In 2007, TN loads through surface runoff totaled 51 966 t, TP loads 7 976 t, in which Hebei Province accounted for the largest proportion of 57% and 58% respectively; Tuhaimajiahe Plain and Heilonggang Yundong Plain occupied the biggest share of 20% and 15% for TN loads, 20% and 16% for TP loads respectively. TN loads through underground leaching totaled 195 875 t, TP loads 140 t, in which Hebei Province accounted for the largest proportion of 55% and 53% respectively; Tuhaimajiahe Plain and Heilonggang Yundong Plain occupied the biggest share of 19% and 13% for TN respectively.

Keywords: Hai Basin; crop farming; NPS loads

改革开放以来, 伴随着我国经济的快速增长, 人类活动和资源环境的矛盾加剧, 水资源短缺和水环境污染的形势日益严峻。《2008 中国环境状况公报》指出, 全国 7 大水系 200 条河流 409 个断面中, ~

类、~ 类和劣 类水质的断面所占比例分别为 55.0%、24.2% 和 20.8%。其中, 珠江、长江水质总体良好, 松花江为轻度污染, 黄河、淮河、辽河为中度污染, 海河为重度污染。

海河流域是我国的经济和文化中心, 其中包括首都北京, 却成为我国水污染最严重的流域, 面临着有河皆干、有水皆污的严峻挑战。2008 年, 63 个断面中: ~ 类水质断面占 28.6%, 类占 14.3%, 类占 6.3%, 劣 类占 50.8%。因此, 改善海河流域水资源和水环

收稿日期: 2010-03-25

基金项目: 全球环境基金(GEF)海河流域水资源与水环境综合管理项目《海河流域农业非点源污染防治战略研究》

作者简介: 朱梅(1967—), 女, 内蒙古包头人, 主要从事水资源和水环境的研究。E-mail: zmkzmzzy@126.com

境任务迫在眉睫。水体污染分为点源和非点源两大类,非点源污染又包括农业非点源和城市非点源。多年来,我们把关注的重点都放到了点源污染上,非点源污染没有引起足够的重视。《第一次全国污染源普查公报》显示,农业源污染物排放对我国水环境的影响较大。2007年化学需氧量排放量为 $1\,324.09 \times 10^4$ t,占化学需氧量排放总量的43.7%;总氮排放量 270.46×10^4 t,占排放总量的57.2%;总磷排放量 28.47×10^4 t,占排放总量的67.4%。因此,农业非点源污染是影响我国水体污染的重要因素。

到目前为止,国内还没有文献专门对海河流域全流域的农业非点源污染负荷进行研究。海河流域第二次水资源评价首次涉及非点污染源调查,包括了城镇地表径流、化肥农药使用、农村生活污水及固体废弃物、水土流失、分散式饲养畜禽废水等5个方面,估算了2000年海河流域非点污染源的产生量和入河量,结论是海河流域COD和氨氮主要来自于点源,总氮和总磷主要来自于非点源。该项研究在流域级非点源污染负荷估算方面做出了积极的探索,但是总体上比较粗糙,没有细分各类农业非点污染源,没有区别不同区域非点源污染的差异,各种系数的选用也比较单一,缺乏科学依据。本文首次对海河流域全流域的种植业非点源污染负荷进行专门研究,将研究区进行划分,细化了非点源污染负荷量的分区贡献,并估算了地下淋溶的氮磷流失量,是评估农业非点源污染对水体污染的影响程度,科学分配点源和非点源的消减指标,进而采取有效控制措施的前提,同时对于探索符合中国实际的大尺度农业非点源污染负荷估算方法有着重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况^[1-4]

海河流域位于我国华北地区,地跨8省、自治区和直辖市,包括北京、天津全部,河北省绝大部分,山西省东部,河南、山东两省北部,以及内蒙古自治区和辽宁省一小部分。流域总面积 32×10^4 km²,占全国面积的3.3%。

海河流域包括滦河、海河和徒骇马颊河3大水系,分为滦河及冀东沿海、北三河、永定河、大清河、子牙河、黑龙江运东、漳卫南运河、徒马河等8大水系。

海河流域的主体是京、津、冀,有首都北京、直辖市天津,地级以上城市26个,是我国的政治文化中心和经济发达地区,扮演着与长三角、珠三角鼎足而立

的角色。2005年,海河流域人口1.34亿,占全国的10.2%;国内生产总值25750亿元,占全国的14.1%。在这片占国土面积3.3%的土地上,聚集了10%的人口和14%的经济总量。

海河流域是国家3大粮食生产基地之一,也是京津等大中城市主要的“菜篮子”生产基地。2005年耕地面积 $1\,056 \times 10^4$ hm²,占全流域面积的33%;粮食总产量 $4\,762 \times 10^4$ t,占全国的9.9%;平均每公顷产量44470 kg,人均粮食占有量355 kg。

海河流域是我国水资源开发利用程度最高的流域,也是水污染最严重的流域。从20世纪70年代初起,先后发生了3起闻名全国的水污染事件,即1971年官厅水库、1974年蓟运河、1975年白洋淀水污染事件。进入80年代以后,随着社会经济的迅速发展,水污染形势愈发严重。水污染已由局部发展到全流域,由下游蔓延到上游,由城市扩散到农村,由地表延伸到地下。

根据《海河流域水资源公报》的数据整理分析,海河流域近年(1998—2008年)受污染(水质劣于Ⅲ类)河长平均占评价河长的65%,其中受严重污染(水质劣于Ⅳ类)河长占评价河长的53%,超过一半的河水受到严重污染。受污染(水质劣于Ⅲ类)水库数量平均占评价水库总数的17.3%。水库富营养化问题也较为严重,从2005年开始就没有了贫营养水库,富营养水库数量急剧增加。

不仅是地表水,海河流域浅层地下水水质也堪忧。海河流域第二次水资源评价结果显示,评价区域的浅层地下水环境质量总体状况较差,海河平原及山间盆地受人类活动影响的地下水污染面积为 6.24×10^4 km²,占评价面积的42.7%。其中轻污染面积占23%,重污染面积占18.6%。

1.2 种植业输出系数模型

由于非点源污染排放时间的随机性、途径的不确定性,特别是污染负荷的时空差异性,使得对其监测、模拟与控制面临巨大的困难。非点源污染的产生本质上是一个水文过程,是污染物从土壤圈向水圈扩散的过程,要估算非点源污染负荷并对其影响进行评价时,最有效的方法是建立模拟模型,进行时间序列和空间尺度的模拟计算^[5-10]。

海河流域尺度大,缺乏相关数据积累,暂不具备使用机理模型的条件^[11-12]。因此,本文针对海河流域种植业的特点,借鉴输出系数法(或称单位负荷法)的思路^[13-14],建立了种植业输出系数模型,对海河流域种植

业非点源污染负荷进行估算。

影响种植业化肥流失的主要因素是耕地面积、单位耕地面积化肥施用量以及化肥流失系数。种植业输出系数模型计算公式如下：

$$L = \sum EQA$$

式中 L 为总氮或总磷的流失总量(污染负荷量) t E 为某种农作物类型总氮或总磷的流失系数 $\%$ Q 为该种农作物单位耕地面积的化肥施用量(纯量) $kg \cdot hm^{-2}$ A 为该种农作物类型占用的耕地面积 hm^2 。其中：

$E = (\text{常规施肥总氮或总磷流失量} - \text{不施化肥总氮或总磷流失量}) / \text{氮肥或磷肥施用量(纯量)}$

1.3 估算思路

由于海河流域面积较大,地形地貌、土壤类型、种植类型、种植模式都不尽相同,为了能反映不同水系、不同地形的种植业非点源污染负荷,需要对海河流域进行分区。首先按照水系把整个海河流域分成 4 个二级区,在二级区的基础上,再按照地形分成 15 个三级区,其中 7 个山区分区,8 个平原分区(表 1)。

以每一个县(区,市)为单位,进行种植业非点源污染负荷量的估算。把三级区内所有县(区,市)的污染负荷量相加,就得到该三级区的污染负荷量,再把 15 个三级区的污染负荷量相加,就可以得到整个海河流域的污染负荷量。

1.4 数据获取

运用种植业输出系数模型估算氮磷负荷量,需要三方面的数据:一是每种农作物类型的耕地面积,二是每种农作物类型单位耕地面积氮磷施用量(纯量),三是相应的氮磷流失系数。

从海河流域各省 2008 年的统计年鉴、农村统计年鉴、调查年鉴以及各市的统计年鉴中,可以获得各县(区,市)2007 年各种农作物的播种面积(表 2)和年

表 1 海河流域分区表

Table 1 Water districts in Hai Basin

二级区	三级区	面积/km ²	县(区,市)数量
海河北系	北三河山区	21 630	7
	北四河下游平原	16 617	14
	永定河册田水库以上山区	19 182	15
	永定河册田水库至三家店区间	25 997	17
	海河南系	大清河淀东平原	14 309
海河南系	大清河淀西平原	12 323	16
	大清河山区	18 807	12
	黑龙港及运东平原	22 444	31
	漳卫河平原	9 536	21
	漳卫河山区	25 326	32
	子牙河平原	15 385	20
	子牙河山区	30 943	19
滦河及冀东沿海	滦河平原及冀东沿海诸河	10 460	10
	滦河山区	44 070	19
徒骇马颊河	徒骇马颊河平原	33 012	32
合计		320 041	285

末常用耕地面积。海河流域主要粮食作物是玉米、小麦、大豆和水稻,分别占粮食作物总播种面积的 46.60%、38.11%、2.80%和 1.29%,4 项合计占粮食作物总播种面积的 88.8%。经济作物主要是棉花和油料,另外蔬菜的播种面积很可观,达到 $200 \times 10^4 km^2$,园地面积也有 $90 \times 10^4 km^2$ 。冬小麦-夏玉米轮作是海河流域的典型种植方式,一年两熟。海河流域不属于我国水稻种植的优势区,水稻种植面积有限,以单季稻为主。华北平原是重要的棉区,包括河北省大部、山东全省及河南省的豫北地区。其一熟棉田主要分布于河北黑龙港地区、山东鲁西北地区 and 滨海盐碱地及河南豫北地区。

用各县(区,市)的农作物总播种面积除以年末常

表 2 海河流域主要农作物播种面积($10^3 hm^2$)

Table 2 Planting area of main crops in Hai Basin($10^3 hm^2$)

省份	总播种面积	i 粮食作物	①小麦	②玉米	③水稻	④大豆	ii 棉花	iii 油料	iv 蔬菜	园地面积
北京	295	197	41	139	1	9	2	7	70	115
天津	434	292	105	162	14	9	68	2	63	29
河北	8 653	6 168	2 412	2 863	85	181	680	498	1 180	638
山西	1 413	1 231	59	765	1	74	1	64	87	37
河南	1 853	1 393	776	516	41	25	63	146	237	31
山东	2 810	1 965	1 018	890	9	25	405	51	382	54
内蒙古	461	329	32	99	0	5	0	29	32	2
辽宁	96	83	-	-	-	-	0	0	3	17
合计	16 015	11 659	4 443	5 433	151	327	1 217	797	2 054	923

资料来源:根据各省市统计年鉴数据整理。

用耕地面积,就得到复种指数。通过复种指数,就可以计算出一熟和二熟作物分别占用的耕地面积,以便和相应的化肥流失系数相对应。

单位耕地面积化肥施用量采用统计年鉴和实地调查相结合的办法,各省市的统计年鉴中只有总的化肥施用量,没有区分不同农作物类型之间的差异,这就需要结合实地调查的结果来确定。

最关键的是化肥流失系数。除挥发损失外,化肥有两种流失方式。

第一,随下渗的水分向土壤深层迁移,污染地下水,也即地下淋溶方式。旱地土壤中硝化作用强烈,残留在土壤中的无机氮主要以硝态氮的形式存在,极易随土壤水向下迁移,一旦被淋溶到作物根区以下,就很难再被作物吸收利用。深层土壤反硝化过程微弱,一般情况下硝态氮很难转化为其他形态的氮,只能随着土壤水分的向下运动而迁移,构成对地下水污染的潜在威胁。

第二,当降水强度大于土壤入渗能力时或当农田排水时,发生土壤侵蚀,产生地表径流,土壤氮磷随地表径流和泥沙向地表水体迁移,也即地表径流方式。

这两种迁移方式都会造成农业非点源污染。首先,随地表径流流失的农田氮磷是水体富营养化的主要来源;其次,硝态氮还可以通过地下淋溶方式污染地下水,是造成地下水硝酸盐超标的重要原因。由于磷肥施入土壤中磷素易被固定,磷肥对地下水的影响很小。

化肥流失系数取决于化肥流失量和化肥施用量,在化肥施用量已知的情况下,化肥流失量受地形地貌、土壤类型、降水径流、农作物类型、种植方式、施肥种类、施肥数量和施肥方式等的影响,不同农作物类型之间以及区域之间差异很大,需要做具体实验才能确定。通常而言,坡地的流失量大于平地的流失量,降水径流量大的地区的流失量大于降水径流量小的地区的流失量;二熟作物的流失量大于一熟作物的流失量。一熟作物中,水稻的流失量大于其他一熟作物的流失量;二熟作物中,蔬菜由于施肥量较高,其流失量大于其他作物的流失量。因此,把化肥流失系数分成水稻、大田一熟作物、蔬菜、小麦玉米两熟、大田其他二熟作物和园地几种类型。

本文整理分析了现有文献对海河流域各种农作物氮磷流失的实验成果^[16-23],以及海河流域各省农业污染源监测实验点径流池实验的数据,得出了在常规施肥条件下,海河流域主要农作物地表径流和地下淋

溶方式总氮和总磷的流失系数(表3)。

对于不同的分区,由于地形和降水量不同,对上述化肥流失系数要进行相应的修正。参照《全国水环境容量核定技术指南》中提出的标准农田(标准农田指的是平原、种植作物为小麦、土壤类型为壤土、化肥施用量为 $25\sim 35\text{ kg}\cdot 666.6\text{ m}^{-2}\cdot \text{a}^{-1}$,降水量在 $400\sim 800\text{ mm}$ 范围内的农田)的修正系数(坡度修正:坡度在 25° 以下,流失系数为 $1.0\sim 1.2$, 25° 以上,流失系数为 $1.2\sim 1.5$ 。降水量修正:年降雨量在 400 mm 以下的地区取流失系数为 $0.6\sim 1.0$,年降雨量在 $400\sim 800\text{ mm}$ 之间的地区取流失系数为 $1.0\sim 1.2$ 。),同时结合各三级区的实际情况,确定了各三级区的修正系数(表4)。修正后的化肥流失系数等于修正前流失系数乘以修正系数。对于地下淋溶方式的化肥流失系数,由于缺乏在不同坡度和降水条件下的实验数据可供对比分析,暂时无法细化。

2 结果与分析

运用上述种植业输出系数模型,海河流域2007年地表径流和地下淋溶方式总氮和总磷流失量及流失比例计算结果见表5和图1~图8。

3 结论和讨论

2007年,全流域地表径流总氮流失量为 $51\,966\text{ t}$,总磷为 $7\,976\text{ t}$,其中河北省所占比例最大,分别为 57% 和 58% 。原因显而易见,河北省是海河流域的主体,耕地面积约占海河流域总耕地面积的 53% 。从水资源三级区来看,平原地区远高于山区,特别是徒骇马颊河平原和黑龙港及运东平原,分别占总氮流失量的 20% 和 15% ,总磷流失量的 20% 和 16% 。徒骇马颊河平原和黑龙港及运东平原位于海河流域东南部,是流域最主要的农业种植区,包括山东省的西北部、河北省的东南部和河南省的一部分,面积分别为 $33\,012$

表3 海河流域不同农作物化肥流失系数

Table 3 Export coefficient of TN and TP for different kinds of crops in Hai Basin

农作物种类	地表径流流失系数/%		地下淋溶流失系数/%	
	TN	TP	TN	TP
单季稻	1.555	0.275	-	-
大田一熟	0.563	0.350	0.863	-
大田两熟	1.001	0.393	1.464	-
蔬菜	0.860	0.427	2.104	0.037
园地	0.727	0.437	0.976	-

表 4 海河流域化肥流失系数修正系数

Table 4 Modification to the export coefficient of TN and TP of different water districts in Hai Basin

二级区	三级区(地形)	多年平均降水量/mm	修正系数(地表径流方式)	
			TN	TP
海河北系	北三河山区	564	0.76	0.70
	北四河下游平原	595	1.00	1.00
	永定河册田水库以上山区	404	0.47	0.32
	永定河册田水库至三家店区间	423	0.42	0.28
海河南系	大清河淀东平原	533	1.00	1.00
	大清河淀西平原	517	1.00	1.00
	大清河山区	581	0.93	0.91
	黑龙港及运东平原	543	1.00	1.00
	漳卫河平原	571	1.00	1.00
	漳卫河山区	595	0.71	0.60
	子牙河平原	501	1.00	1.00
	子牙河山区	532	0.76	0.68
	滦河及冀东沿海	滦河平原及冀东沿海诸河	630	1.00
	滦河山区	529	0.47	0.34
徒骇马颊河	徒骇马颊河平原	564	1.00	1.00

表 5 海河流域各省/三级区地表径流和地下淋溶方式氮磷流失量
Table 5 TN and TP loads through surface runoff and underground leaching of each province and water district in Hai Basin

分区	县(区,市)数量	地表径流方式		地下淋溶方式	
		TN/t	TP/t	TN/t	TP/t
北三河山区	7	1 098	181	5 241	1
北四河下游平原	14	2 281	352	8 444	11
永定河册田水库以上山区	15	1 066	133	6 566	1
永定河册田水库至三家店区间	17	1 196	146	8 702	0
大清河淀东平原	20	3 829	640	12 547	7
大清河淀西平原	16	3 446	541	11 596	11
大清河山区	12	1 722	289	6 364	2
黑龙港及运东平原	31	7 786	1 304	25 365	11
漳卫河平原	21	5 065	765	17 433	17
漳卫河山区	32	2 165	309	9 465	4
子牙河平原	20	5 268	814	18 643	20
子牙河山区	19	1 885	293	7 723	3
滦河平原及冀东沿海诸河	10	2 821	398	8 931	9
滦河山区	19	1 749	222	11 864	3
徒骇马颊河平原	32	10 589	1 589	36 991	40
流域合计	285	51 966	7 976	195 875	140
北京	13	1 560	269	6 484	3
天津	12	1 621	256	5 665	3
河北	142	29 561	4 652	107 781	74
山西	44	2 332	294	14 285	1
河南	34	6 488	951	21 614	23
山东	29	9 619	1 468	34 249	36
内蒙古	9	641	72	4 470	0
辽宁	2	144	15	1 327	0

km² 和 22 444 km², 二者合计占全流域总面积的 17.33%, 却占到全流域地表径流总氮流失量的 35%, 总磷流失量的 36%。

全流域地下淋溶总氮流失量为 195 875 t, 总磷为 140 t, 因为磷在土壤中不易移动, 所以地下淋溶流失的主要是氮。其中河北省所占比例也是最大, 分别占 55% 和 53%。从水资源三级区来看, 平原地区远高于山区, 特别是徒骇马颊河平原和黑龙港及运东平原, 分别占总氮流失量的 19% 和 13%。

根据种植业输出系数模型, 总氮或总磷的流失量取决于该地区各种农作物类型的耕地面积、单位耕地面积化肥施用量和化肥流失系数。在短期内, 耕地面积和单位面积施肥量基本稳定, 具体数据也容易确定, 影响污染负荷量最关键的因素就是流失系数。本文所选取的流失系数, 是在海河流域多个监测点进行径流池实验, 在一年中连续监测的结果, 因此还有以下问题需要进一步研究。

(1) 本文采用的化肥流失系数能够反映出不同作物类型、种植方式、耕作方式、农田类型、土壤类型、地形地貌的氮磷流失量的差异, 但不能反映年际之间不同降雨量径流量和化肥流失量之间的相关关系, 需要进行多年连续的监测实验。

(2) 根据该模型计算出的地表径流总氮和总磷的流失量, 指的是流失到农田灌溉沟渠中的总氮和总磷, 并不意味着这些总氮和总磷都能够进入水体, 也就是说, 还有入河量的问题。灌溉沟渠是否联通河道、

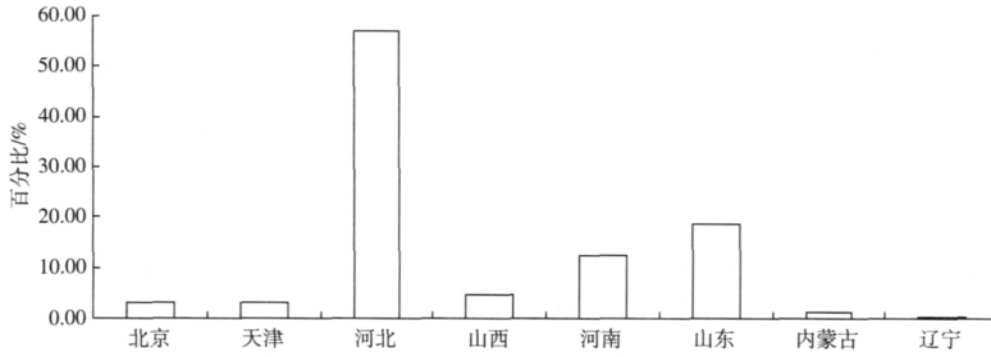


图1 各省、市、自治区地表径流总氮流失比例

Figure 1 Proportion of TN loads through surface runoff of each province

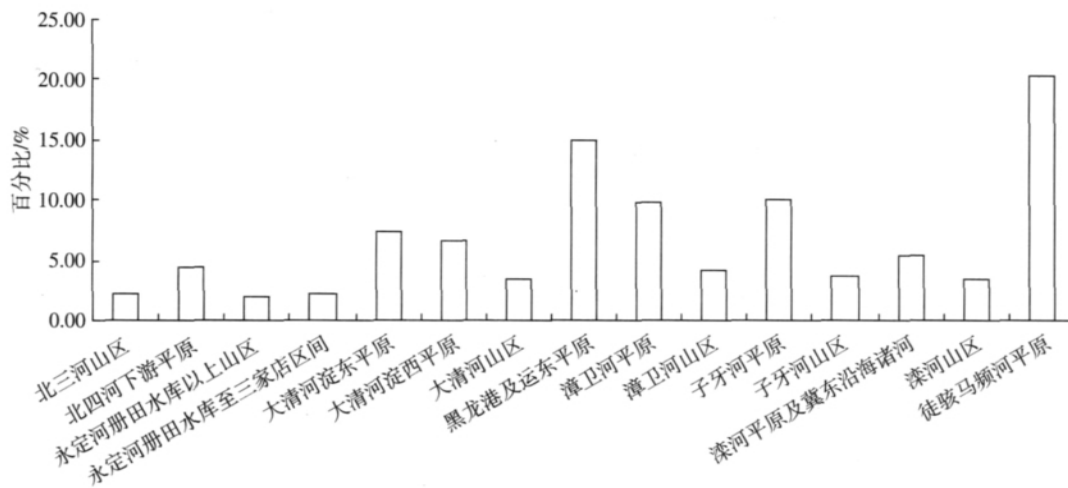


图2 各三级区地表径流总氮流失比例

Figure 2 Proportion of TN loads through surface runoff of each water district

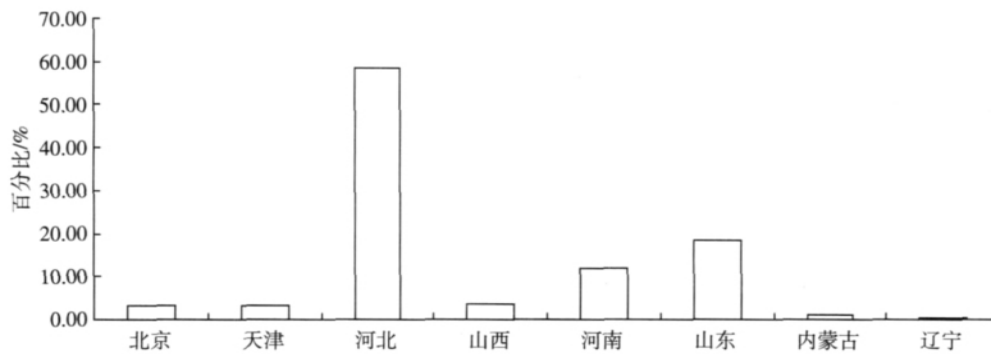


图3 各省、市、自治区地表径流总磷流失比例

Figure 3 Proportion of TP loads through surface runoff of each province

距离的远近、有无闸坝拦截等,特别是径流量的大小,都是影响入河量的因素,需要进一步研究。

(3)根据该模型计算出的地下淋溶总氮和总磷的流失量,指的是淋失到地下放置淋溶实验装置深度的总氮和总磷(地下淋溶实验装置一般放置在地下90cm左右),并不意味着这些总氮和总磷都能够到达和污染地下水。地下水的埋深、地下土壤结构等都是影响

因素。地下水污染有多种原因,地下淋溶是否会污染到地下水,影响程度有多大,也需要进一步研究。

参考文献:

[1]任宪韶,户作亮,曹寅白.海河流域水利手册[M].北京:中国水利水电出版社,2008.

REN Shao-xian, HU Zuo-liang, CAO Yin-bai. Water resources hand-

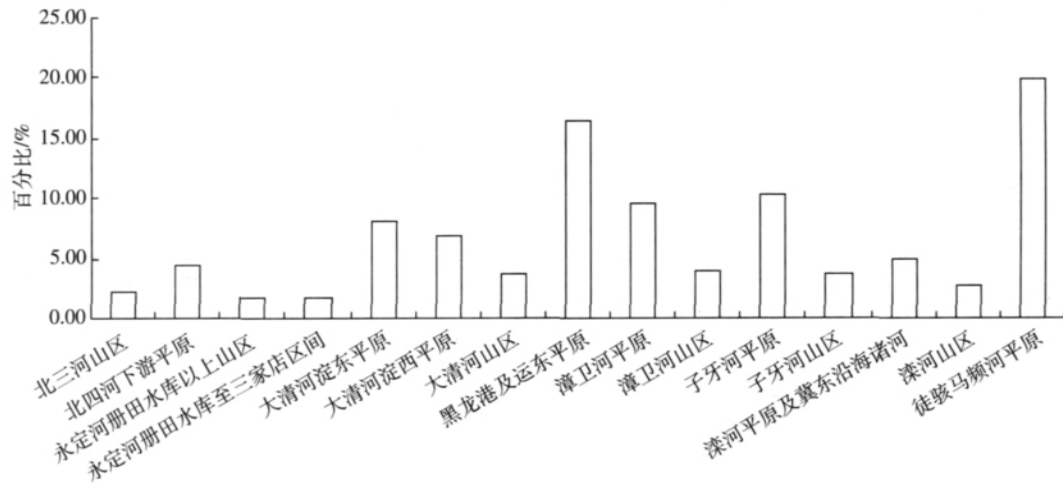


图 4 各三级区地表径流总磷流失比例

Figure 4 Proportion of TP loads through surface runoff of each water district

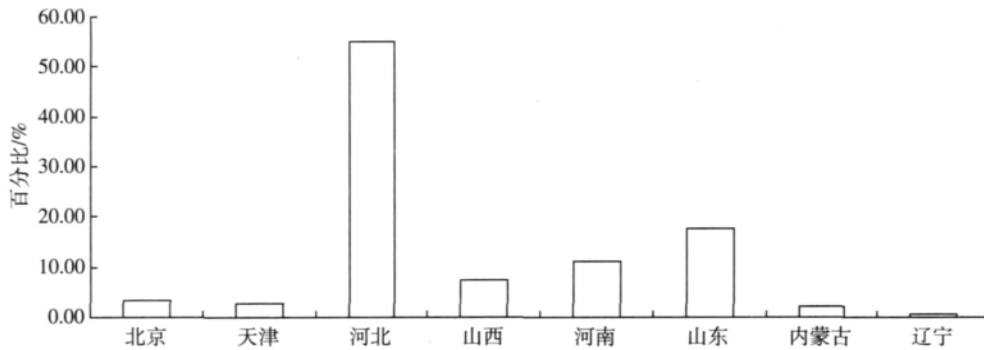


图 5 各省、市、自治区地下淋溶总氮流失比例

Figure 5 Proportion of TN loads through underground leaching of each province

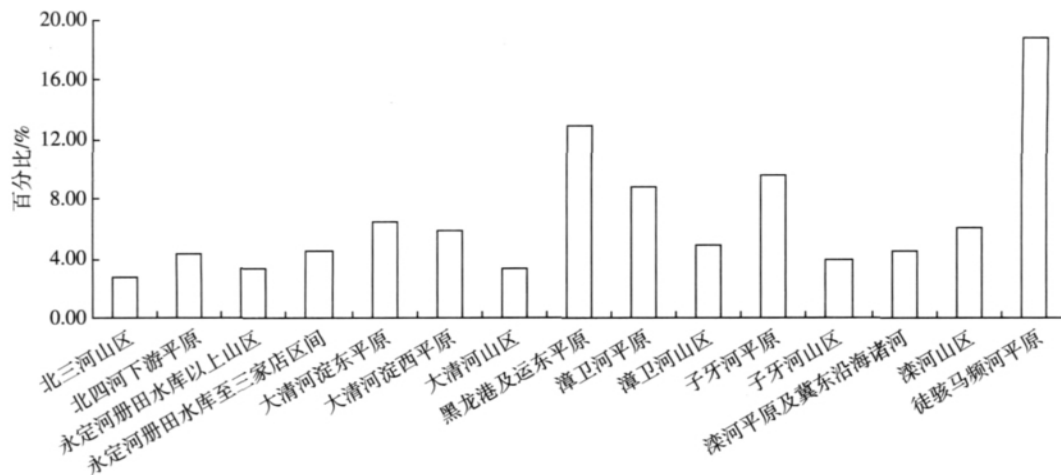


图 6 各三级区地下淋溶总氮流失比例

Figure 6 Proportion of TN loads through underground leaching of each water district

book for Hai Basin[M]. Beijing :China Water Resources & Hydroelectricity Press, 2008.

[2] 李惠敏, 霍家明, 于 卉. 海河流域水污染现状与水资源质量状况综合评价[J]. 水资源保护, 2000(4) :12-14.

LI Hui-min, HUO Jia-ming, YU Hui. Current situation of water pollu-

tion and composite water resources quality evaluation of Hai Basin[J]. *Water Resources Conservation*, 2000(4) :12-14.

[3] 水利部海河水利委员会. 海河流域水资源公报, 1998-2008.

Hai Basin Water Resources Committee of Ministry of Water Resources. *Water Resources Communique of Hai Basom*, 1998-2008.

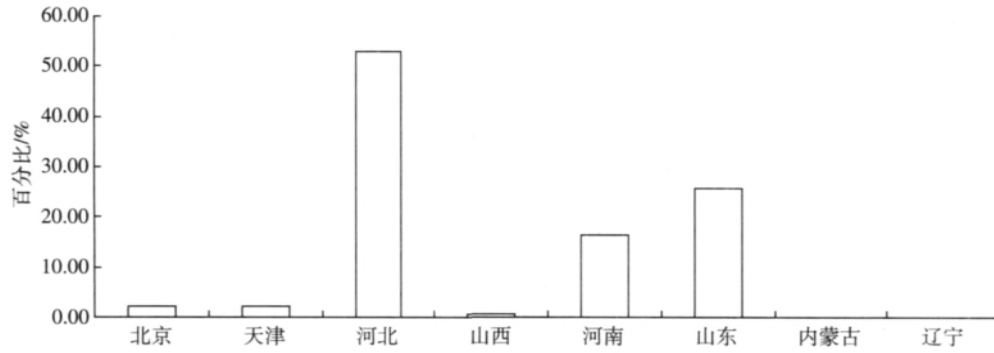


图7 各省、市、自治区地下淋溶总磷流失比例

Figure 7 Proportion of TP loads through underground leaching of each province

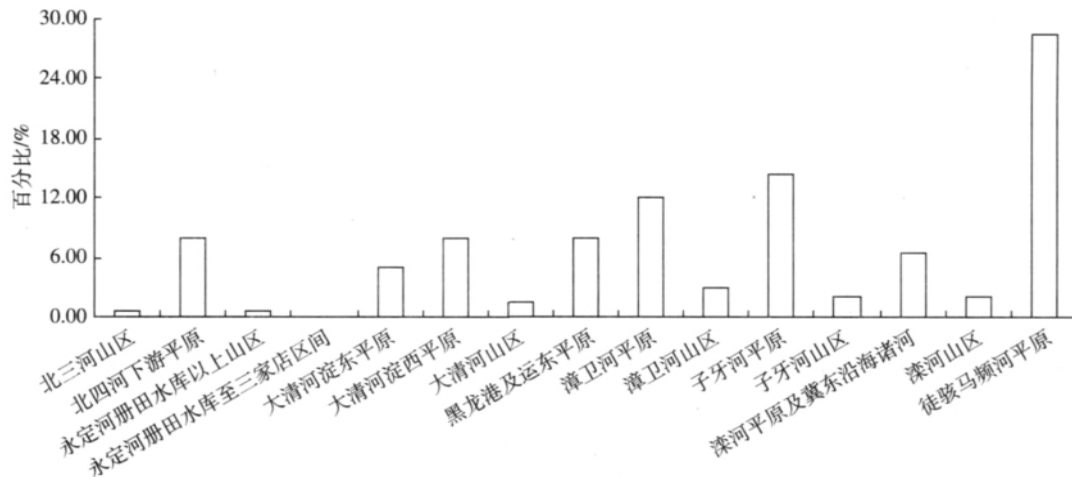


图8 各三级区地下淋溶总磷流失比例

Figure 8 Proportion of TP loads through underground leaching of each water district

- [4] 任宪韶. 海河流域水资源评价[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.
REN Xian-shao. Water resources evaluation of Hai Basin[M]. Beijing: China Water Resources & Hydroelectricity Press, 2008
- [5] 史伟达, 崔远来. 农业非点源污染及模型研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2009(5): 61-64.
SHI Wei-da, CUI Yuan-lai. Research progress of agriculture non-point source pollution and models[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(5): 61-64.
- [6] Polyakov V, Fares A, Kubo D, et al. Evaluation of a non-point source pollution model AnnAGNPS in a tropical watershed[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(11): 1617-1627.
- [7] 杨胜天, 程红光, 步青松, 等. 全国土壤侵蚀量估算及其在吸附态氮磷流失量匡算中的应用[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 366-374.
YANG Sheng-tian, CHENG Hong-guang, BU Qing-song, et al. Estimation of soil erosion and its application in assessment of the absorbed nitrogen and phosphorus load in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(3): 366-374.
- [8] Bhuyan S J, Koelliker, et al. An integrated approach for water quality assessment of a Kansas watershed[J]. *Environment Modeling & Software*, 2003, 18: 473-484.
- [9] Borah D K, Bera M. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: review of mathematical bases[J]. *Transaction of the ASAE*, 2003, 46(6): 1553-1566.
- [10] Zhang W, Wang X J. Modeling for point-non-point source effluent trading: Perspective of non-point regulation in China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, 292: 167-176.
- [11] 郝芳华, 杨胜天, 程红光, 等. 大尺度区域非点源污染负荷估算方法研究的意义、难点和关键技术[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 362-365.
HAO Fang-hua, YANG Sheng-tian, CHENG Hong-guang, et al. The significance, difficulty and key technologies of large scale model applied in estimation of non-point source pollution[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(3): 362-365.
- [12] 郝芳华, 杨胜天, 程红光. 大尺度区域非点源污染负荷计算方法[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 375-382.
HAO Fang-hua, YANG Sheng-tian, CHENG Hong-guang. A method for estimation of non-point source pollution load in the large-scale basins of China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(3): 375-382.
- [13] 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 ap-

- plication[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2003, 19(4) : 307-312.
- [14] 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.
- [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]. *J Hydrol*, 1996, 183 : 323-349.
- [16] 马保国, 刘永朝, 薛进军. 冀南稻麦轮作区化肥施用与氮磷流失状况分析[J]. *灌溉排水学报*, 2006, 26(3) : 72-74.
MA Bao-guo, LIU Yong-chao, XUE Jin-jun. Application of chemical fertilizer and the loss of nitrogen and phosphorus in rice and wheat rotation soil in south Hebei[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2006, 26(3) : 72-74.
- [17] 井大伟. 优化施氮对高产小麦/玉米间作产量和氮利用率的影响[J]. *山东农业科学*, 2008(9) : 55-60.
JING Da-wei. Effect of optimum nitrogen fertilization on grain yield and nitrogen use efficiency of wheat and maize by high-yielding intercropping[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2008(9) : 55-60.
- [18] 黄满湘, 章 申, 张国梁. 北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理[J]. *地理学报*, 2003, 58(1) : 147-154.
HUANG Man-xiang, ZHANG Shen, ZHANG Guo-liang. Losses of nitrogen nutrient in overland flow from farmland in Beijing under simulated rainfall conditions[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1) : 147-154.
- [19] 陈 健, 宋春梅, 刘云慧. 黄淮海平原旱田氮素损失特征及其环境影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(2) : 99-102.
CHEN Jian, SONG Chun-mei, LIU Yun-hui. Characteristics of N loss and its environmental effects in the dryland of Huang-Huai-Hai plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(2) : 99-102.
- [20] 张维理, 田哲旭, 张 宁, 等. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. *植物营养与肥料学报*, 1995, 1(2) : 80-87.
ZHANG Wei-li, TIAN Zhe-xu, ZHANG Ning, et al. Investigation of nitrate pollution in ground water due to nitrogen fertilization in agriculture in north China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 1995, 1(2) : 80-87.
- [21] 刘宏斌, 李志宏, 张云贵, 等. 北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J]. *土壤学报*, 2006, 43(3) : 405-413.
LIU Hong-bin, LI Zhi-hong, ZHANG Yun-gui, et al. Nitrate contamination of deep groundwater in rural plain areas of Beijing[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3) : 405-413.
- [22] 刘宏斌, 李志宏, 张维理, 等. 露地栽培条件下大白菜氮肥利用率与硝态氮淋溶损失研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(3) : 286-291.
LIU Hong-bin, LI Zhi-hong, ZHANG Wei-li, et al. Study on N use efficiency of chinese cabbage and nitrate leaching under open field cultivation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(3) : 286-291.
- [23] 张贵龙, 任天志, 李志宏, 等. 施氮量对白萝卜硝酸盐含量和土壤硝态氮淋溶的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(4) : 877-883.
ZHANG Gui-long, REN Tian-zhi, LI Zhi-hong, et al. Effects of nitrogen fertilization on nitrate content of radish (*Raphanus sativus* L.) and soil nitrate leaching[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(4) : 877-883.