

我国非点源污染研究中输出系数问题

应兰兰^{1,2}, 侯西勇¹, 路晓^{1,2}, 朱明明^{1,2}

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 非点源污染 (Non-Point Source pollution, NPS) 是水环境污染的重要方面, 而且, 随着点源污染控制水平的不断提高, 非点源污染在水环境污染中的危害性愈来愈突出。本文在对输出系数法及输出系数模型进行简要介绍的基础上, 对近年来国内非点源污染热点研究区的输出系数进行梳理和比较, 总结出输出系数确定的三种常用方法: 查阅文献法, 野外监测法, 数学统计分析法, 并通过查阅文献得出热点研究区平均输出系数参照表, 分析各区域输出系数的特征和规律, 以便为当前及今后非点源污染研究中输出系数的选择提供参考依据。

关键词: 非点源污染; 输出系数; 输出系数法; 水环境污染

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2010)06-0090-06

Discussion on the export coefficient method in non-point source pollution studies in China

YING Lan-lan^{1,2}, HOU Xi-yong¹, LU Xiao^{1,2}, ZHU Ming-ming^{1,2}

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Non-point source pollution (NPS) is an important aspect of water pollution, and its hazard has become more and more prominent along with the continuous improvement of abilities to control point-source pollution. Based on the brief introduction of the export coefficient method and export coefficient model, the export coefficients have been summarized, and NPS export coefficients in many case studies have been summed up. Furthermore, the characteristics and rules of export coefficients in the most important hot spot study areas have been summarized. All the work and findings mentioned above will be helpful for determining accurate and reasonable export coefficients in future.

Key words non-point source pollution; export coefficient; export coefficient method; water pollution

非点源污染 (Non-Point Source pollution, NPS) 指在降雨径流的冲刷和淋溶作用下, 大气、地面和土壤中的溶解性或固体污染物进入江河、湖泊、水库和海洋等水体而造成的水环境污染^[1-2]。与点源污染相比, 非点源污染具有空间上的广泛性和时间上的不确定性、滞后性、模糊性, 且过程机理更复杂, 信息获取难度大, 研究、控制与管理难度大等特点^[3-4]。相对于国外, 我国水环境非点源污染研究起步较晚, 当前, 主要是引用国外开发的水文水质模型对不同流域进行模拟分析, 但由于我国多数流域缺乏长时间序列监测资料, 使得参数校准和率定较为复杂, 严重阻碍了模型的广泛应用。而由北美国家提出的输出系数法所需参数少, 建模费用低且能保证一定的精度, 在大中尺度流域具有较好的适用

性。当前, 该方法作为一种经典的方法已被国内众多学者改进并运用于一些热点流域的非点源污染负荷模拟研究中。然而, 输出系数是输出系数模型中最重要, 也是最难以确定的参数, 它的合理性和准确性直接影响流域非点源污染负荷的模拟精度, 因而, 确定合理的输出系数值是输出系数法的关键。当前, 国内相关研究中非点源污染输出系数值多是直接引用和摘录国内外文献中系数值, 缺乏对输出系数的系统性和全面化整理与分析, 在一定程度上阻碍了输出系数法的推广运用和改进。有鉴于此, 收集和整理国内已有研究成果中热点研究区的非点源污染输出系数值, 并对相关问题进行分析和讨论, 这对当前及今后的非点源污染研究中输出系数的确定具有重要意义。因此, 本文在前人研究的基础上,

收稿日期: 2010-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40801016); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (kzcx2-yw-224); 中国科学院资源与环境信息系统国家重点实验室开放研究基金资助项目 (A0713) 资助

作者简介: 应兰兰 (1986-), 女, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事土地利用变化及其水环境效应等方面研究。

对太湖流域等热点研究区域的污染物输出系数值进行总结, 并分析我国不同流域非点源污染输出系数的特征, 探索土地利用变化对非点源污染的影响, 为今后国内各流域非点源污染研究提供参考依据。

1 污染物输出系数和输出系数法

1.1 基本概念

污染物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, 采用单位时间单位面积污染物负荷量表示 ($\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)^[5]。输出系数在很大程度上反映了区域非点源污染输出的强度, 但是, 广义上讲, 除了单位面积输出负荷系数 ($\text{kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$), 污染物输出系数还包括另一种形式, 即暴雨事件平均浓度值 (Event Mean Concentration, EMC) (mg/L)。具体而言, 单位面积输出负荷系数代表某指定区域单位面积上年平均污染输出总量, 主要用于农村地区; 而 EMC 则代表单位径流量中污染物的输出总量, 在刻画城市土地利用类型的径流输出污染物负荷量方面更为有效^[6]。当前, 国内非点源污染研究并未对二者加以严格区分。

输出系数法是指利用污染物输出系数来估算流域非点源污染输出负荷的一种方法。输出系数模型则是输出系数法的具体体现, 是利用半分布式途径来计算流域尺度上年均污染总负荷的数学加权公式, 其实质是一种半分布式的集总模型^[5]。

1.2 模型介绍

20 世纪 70 年代初期, 美国、加拿大学者最先提出输出系数模型并将其应用于研究土地利用 - 营养负荷 - 湖泊富营养化关系。1996 年 Johns 等^[7]在已有研究成果基础上建立了更完备的输出系数模型。该模型对不同的土地利用类型或牲畜种类等分别采用不同的输出系数并考虑居民生活污染输出。在总氮输入方面还进一步考虑了植物固氮、氮的空气沉降等因素, 大大提高了非点源污染负荷估算精度, 模型表达式为:

$$L = \sum_{i=1}^n E_i [A_i (I_i)] + P \quad (1)$$

式中: L 为流域内营养物流失量; n 为流域中土地利用类型的种类或牲畜、人口数; E_i 为营养物在流域第 i 种土地利用类型中的输出系数或第 i 类牲畜、人口的输出系数; A_i 为第 i 类土地利用类型面积或第 i 类牲畜数量、人口数量; I_i 为第 i 种营养源营养物输入量; P 为降雨输入的营养物量。

非点源污染具有时空广泛性, 过程机理较复杂,

受大气、降水、地形地貌等众多因素影响等特征, 因而, 国内许多学者在研究中根据区域实际特征将输出系数模型进行改进以提高模拟精度。蔡明等^[8]考虑降雨因素影响和污染物在迁移过程中的损失从而将降雨影响系数和流域损失系数引入到输出系数模型中, 并应用于渭河流域总氮负荷量的估算。龙天渝等^[9]以输出系数法为基础, 引入污染负荷系数建立非点源氮磷负荷的数学模型, 并与分布式水文模型结合, 对流域输入三峡库区的非点源氮磷污染负荷进行了相关预测和分析。李兆富等^[10]在经典的输出系数模型基础上考虑流域降雨的空间差异, 对模型结构进行了改进, 并与 GIS 实现融合, 构建半分布式的输出系数模型, 对太湖上游的西苕溪流域氮磷营养盐输出负荷进行了估算。这些改进后的输出系数模型较传统模型具有更好的时空尺度适宜性和推广性, 而且机理更明确, 模拟更符合实际。

输出系数模型属于经验模型, 其优点在于所需参数较少、操作简便, 而且具有一定的精度, 适合大中尺度非点源污染负荷估算分析研究, 尤其比较适合我国水文水质监测资料少、研究基础相对薄弱的现实。

2 输出系数的确定方法

影响流域非点源污染物输出系数的因素众多, 主要包括流域内的地形地貌、水文、气候、土壤特征、土地利用结构、植被、管理措施以及人类活动等。从土地利用的角度出发, 一般可以将流域输出系数分为种植用地输出系数、城镇用地输出系数和自然地输出系数三类, 根据实际情况还可以进一步细分。从牲畜类型的角度出发, 可区分大牲畜、猪、牛、羊、家禽等的输出系数, 具体而言是根据各类牲畜每年排泄物中的氮、磷含量及其损失折合计算确定。本文主要讨论不同土地利用类型的污染物输出系数, 在这方面, 近年来国内学者普遍使用的非点源污染输出系数确定方法包括三类: 查阅文献法、野外监测法和数学统计分析法。

2.1 查阅文献法

这是国内普遍采用的一种方法。根据研究区的自然社会条件, 利用前人在相似或邻近区域的研究成果, 直接获取或经过简单的换算确定输出系数。如梁常德等^[11]对三峡库区非点源氮、磷负荷的研究中, 以国外研究各类土地输出系数经验值为基础, 参考施为光对成都市的研究确定城镇用地输出系数, 参照黄真理等计算的三峡库区农田地表径流年

载荷因子确定农田输出系数,参考常娟等对黑河流域的研究和史志华等对汉江中下游的研究确定草地和林地的输出系数等,最终确定一组较优的三峡库区不同土地利用类型污染物输出系数。该方法简单、易于操作,节省了大量的人力、财力,对于缺乏长期水文水质监测资料,且实验条件不充分的地区,可以考虑优先使用该方法。但前人的研究都是在特定时空条件下进行的,所以直接采用已有文献中的输出系数值难免受到各种主客观因素的影响,模拟结果不确定性较大,精度有限。

2.2 野外监测法

野外监测是对研究区内不同土地利用类型构成的流域水质水量进行一段时间的连续监测,通过计算负荷量,得到相应的输出系数值。根据研究区域空间尺度的不同,有两种监测形式:田间人工暴雨模拟监测和流域长期定点监测。例如,梁涛等^[12-14]采用人工降雨模拟实验对浙江省西苕溪流域及官厅水库周边地区不同土地利用类型的土壤氮、磷元素随暴雨径流及径流沉积物的迁移过程进行模拟,并估算氮素在流域内不同土地利用/土地覆被条件下的损失率。李恒鹏、李兆富等人^[15-17]采用小流域出口水质监测数据,利用GIS工具获取各子流域的降水、径流深度、土地利用结构信息等建立小流域不同土地利用类型面积比例与营养物浓度的定量关系,从而计算获得太湖各流域每种土地利用类型的污染物输出系数。野外监测法实验条件易于控制,便于研究不同地形特征和降雨条件对污染物迁移的影响,获取的输出系数精度较高,更好地反映了非点源污染的区域特性,但该方法需进行现场监测,耗时长、费用高,只能用于小尺度流域的研究。

2.3 数学统计分析法

在已有水文水质监测数据基础上,依据非点源污染发生的水文机理建立污染负荷与泥沙或径流量等之间的定量关系模型,从而计算出污染负荷系数。如李怀恩^[18]提出的平均浓度法,根据各次降雨径流过程的水量、水质同步监测资料,先计算每次暴雨各种污染物的平均浓度,再以各次暴雨产生的径流量为权重,求出加权平均浓度,最终采用年径流量分割法计算出年负荷值;洪晓康等^[19]提出了水质水量相关法,基于有限的监测资料,建立次暴雨单位面积径流量和单位面积降雨径流污染负荷量之间的相关关系经验模型,从而可推算出单位面积径流污染负荷系数;丁晓雯等^[20]基于历史水文水质资料,根据污染物质量守恒原则,得到各营养源的输出系数等。

该方法在这些相关区域取得了较好的应用效果,而且包含了一定的水文机理,参数要求低,精度较高,因此具有广泛的适用性。

实际工作中,不同的方法之间往往需要相互结合,综合确定符合研究区域非点源污染特征的输出系数值,以提高非点源污染模拟分析的精度水平。

3 热点研究区非点源污染输出系数

近年来,国内非点源污染的热点研究区域包括太湖、三峡库区、陕西黑河流域、九龙江流域、云南滇池、天津于桥水库、北京市密云水库、东北松花江流域等。通过查阅已有文献,将我国非点源污染研究按流域对输出系数进行梳理和统计分析,分别得出北京密云水库流域、陕西黑河流域、太湖流域、长江中上游地区和福建九龙江流域等流域中耕地、林地、草地、园地和居民地五种主要土地利用类型总氮(TN)及总磷(TP)输出系数值的均值和变化范围,得出各流域非点源污染输出系数参照表。

3.1 热点研究区

密云水库流域属暖温带半湿润季风型气候。地貌以山地、丘陵为主,丘陵区占整个流域面积的4.9%,分析已有研究成果^[13, 21-25]得出该区域多次引用的不同土地利用类型径流中氮、磷平均浓度输出系数。

陕西黑河为渭河右岸的较大支流,属黄河二级支流。全流域面积2258 km²,属暖温带半干旱、半湿润大陆性季风气候区。李怀恩、庄永涛等^[26, 27]以平均浓度法的结果和黑峪口水文站的实测多年平均侵蚀模数为基础,参考国内外的大量研究成果,经过综合分析,得到了黑河流域各类土地利用TN和TP的多年平均输出系数值。

太湖流域位于长江下游,流域面积为36895 km²,属亚热带季风气候。地貌类型包括山地丘陵及平原:山地丘陵面积约占25%,主要分布于流域西部;平原约占75%,分布于流域北部、东部和南部。梁涛、李恒鹏、李兆富等人^[10, 14-17, 28-30]分别通过人工暴雨模拟及现场监测方法确定太湖流域上游山地丘陵区的输出系数。

长江中上游地区非点源污染研究主要集中于三峡库区、嘉陵江流域及汉江流域。三峡库区研究主要范围为长江重庆寸滩断面至长江源头,流域面积约87万 km²,属于亚热带湿润气候,地形以山地和高原为主。嘉陵江流域面积1579万 km²,处于亚热带季风气候区,上游流域为山地丘陵区,土地利用多为灌

木丛、草地、林地; 中下游流域属四川盆地。汉江是长江最大支流, 流域面积 1 519 万 km^2 , 气候具亚热带季风气候的特征。地质构造大致以浙川—丹江口—南漳为界, 以西为褶皱隆起中低山区; 以东以平原丘陵为主。根据已有文献^[9, 11, 20, 31-33]研究成果, 在了解研究区域特征基础上, 对长江中上游地区不同土地利用类型营养盐输出系数进行统计分析。

九龙江是福建省第二大河流, 地处福建省经济较为发达的东南沿海, 流经农业集约化水平较高的漳州平原。总长度 1 923 km, 流域面积 14 741 km^2 。

属亚热带季风气候, 结合已有研究^[34, 35]对九龙江流域输出系数进行统计分析。

3.2 输出系数参照表

对上述热点区域总氮、总磷的输出系数进行摘录、折算及汇总, 得出不同流域输出系数参照表, 如 4 表 2。其中, 居民地输出系数采用村庄和城镇用地输出系数的平均值; 耕地输出系数采用水田和旱地输出系数的平均值。标注 a 表示输出系数为径流溶解态总氮或总磷的平均浓度值; 其他则为单位面积负荷系数值单位为 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

表 1 热点研究区不同土地利用类型总氮输出系数

流域名称		耕地	林地	草地	园地	居民地
密云库区 ^a / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	均值	3.83	3.38	3.75	3.99	27.50
	范围	-	-	-	-	-
太湖流域 ^a / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	均值	2.97	0.90	1.39	2.51	1.79
	范围	0.87~6.04	0.27~2.09	-	-	-
长江中上游 ^a / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	均值	3.61	1.24	2.51	3.25	1.21
	范围	2.65~6.50	1.00~1.50	1.85~3.50	2.00~4.50	1.10~1.35
九龙江流域 ^a / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	均值	3.38	1.25	-	4.73	1.40
黑河流域 / ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	均值	29.00	2.38	14.90	-	-
长江中上游 / ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	均值	28.83	3.58	6.03	14.57	13.28
	范围	15.00~46.30	1.46~6.79	0.60~11.50	11.30~17.48	6.81~20.04
九龙江流域 / ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	均值	28.68	7.75	-	35.39	12.68

表 2 热点研究区不同土地利用类型总磷输出系数

流域名称		耕地	林地	草地	园地	居民地
密云库区 ^a / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	均值	0.39	0.05	0.10	0.28	0.31
太湖流域 ^a / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	均值	0.14	0.02	0.03	0.05	0.12
	范围	0.05~0.38	0.007~0.056	-	-	-
长江中上游 ^a / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	均值	0.24	0.06	0.19	0.25	0.06
	范围	0.12~0.40	0.04~0.09	0.11~0.30	0.20~0.30	0.04~0.07
九龙江流域 ^a / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	均值	0.30	0.07	-	0.18	0.11
黑河流域 / ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	均值	0.90	0.15	0.51	-	-
长江中上游 / ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	均值	5.94	0.57	1.18	3.81	2.75
	范围	2.30~13.50	0.02~1.53	0.80~1.55	2.46~5.16	0.16~6.28
九龙江流域 / ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	均值	2.52	0.71	-	1.35	0.95

4 热点研究区输出系数特征简析

综合上述热点研究区的相关研究成果, 并结合这些区域(流域)的概况及土地利用特征, 总结非点源污染输出系数研究的若干问题和特征。

4.1 输出系数的不确定性

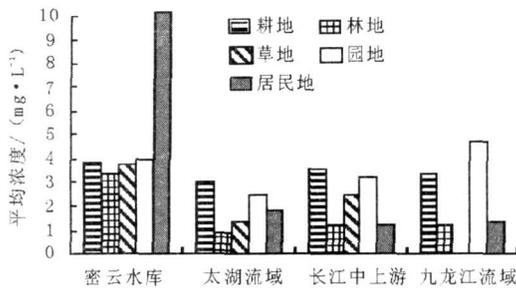
非点源污染输出系数研究的不确定性主要源于同时也突出表现为时空差异性和复杂性两个方面。分析表明, 无论是相似流域之间的同一土地利用类

型, 还是同一流域的不同土地利用类型, 其输出系数的取值范围较为宽泛, 差异较大。如表 1 所示, 太湖流域耕地的总氮径流浓度值最小为 0.87 mg/L , 最大值为 6.04 mg/L , 最小值、最大值之间几乎相差 7 倍; 同为耕地, 黑河流域单位面积输出总氮负荷为 0.90 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 长江中上游为 5.94 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 区域差异超过了 6 倍。总的来说, 输出系数本身具有很强的时空变异性和尺度效应(时间尺度效应和空间尺度效应): 同一流域, 随着时间

的推移,输出系数会随自然和社会因素的变化而变化;在空间上,各流域本身具有较强的区域性,不同的自然、社会、经济和文化要素对非点源污染的作用和影响不同,而且,在一定的尺度范围内,非点源污染受产、汇流过程中吸附和滤过等流域生态系统营养盐调节功能的影响,浓度随着尺度的增大而逐渐降低^[28]。因此,进行具体流域的非点源污染研究时,对输出系数的取值应该遵循因地制宜的原则,注重多种方法的比较和结合。

4.2 不同流域(区域)之间输出系数的定性比较

虽然对不同流域(区域)之间的输出系数进行精确地定量比较非常困难,但通过数据比对和定性分析,仍能发现不同流域(区域)之间非点源污染的特征与规律。为了便于分析,本文根据径流溶解态总氮和总磷平均浓度指标,绘制密云水库、太湖流域等 4 个热点研究区不同土地利用类型污染物输出系数柱状图,如图 1 和图 2。



①密云水库地区居民地输出系数数值为 27.5,异常高于其他用地类型,为了便于直观比较,将纵坐标进行压缩;②九龙江流域土地利用分类统计中无草地用地类型。

图 1 各流域不同土地利用类型径流中溶解态总氮平均浓度图

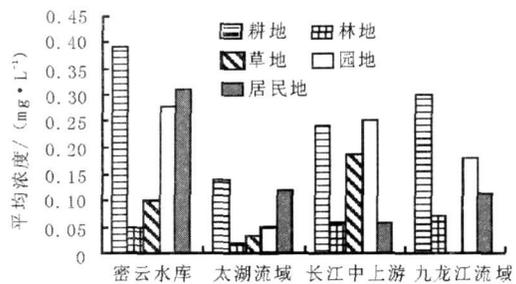


图 2 各流域不同土地利用类型径流中溶解态总磷平均浓度图

由图 1 图 2 可见,总体上,4 个流域非点源污染输出系数存在一定的差异。4 流域溶解态总氮输出系数平均值均小于 4 mg/L(密云水库居民地和九龙江流域园地除外),溶解态总磷输出系数值均小于 0.4 mg/L。各流域之间,密云水库各用地类型溶解态总氮和溶解态总磷的输出系数最大,是 4 个流域中最突出的;其次是九龙江流域和长江中上游地区,太湖流域输出系数最小。溶解态总磷所表现出来的

区域差异性明显高于溶解态总氮。

4.3 不同土地利用类型间输出系数特征

由图 1 图 2 及表 1 表 2 中部分数据分析可知,各流域大多数地区不同土地利用类型非点源污染输出强度大小排序一般为:耕地 > 园地 > 草地 > 林地。居民地的输出强度波动性最大,密云水库流域总氮径流浓度高达 27.50 mg/L,而其它流域均低于 2 mg/L,同样,居民地总磷径流浓度波动性也很大,在 0.04 ~ 0.31 mg/L 之间。可见,耕地、园地和居民地对非点源污染起主要的贡献作用;林地和草地贡献较小。由此可推知,对于某一个地区,土地利用结构变化对营养盐输出具有重要的影响,居民地、耕地和园地面积比例增大,以及林地、草地面积比例减少,则流域或区域营养盐(氮、磷)输出负荷将急剧增大。因此,加强土地利用(土地覆被)变化及其水环境效应方面的研究,在国家及区域层面进行政策引导,合理地退耕还林还草,改善土地利用结构,无疑是控制非点源污染和保护水环境的良策。

4.4 不同营养物间输出系数比较

将表 1 与表 2 中各流域不同土地利用类型对应的输出系数均值数据相除,从而得出每种土地利用类型总氮与总磷输出系数比,如表 3。其中加粗字体显示的流域为单位面积输出负荷系数比,其他的均为径流浓度系数比。

表 3 流域不同土地利用类型总氮与总磷输出系数比值表

流域名称	耕地	林地	草地	园地	居民地
密云库	9.82	67.60	37.50	14.25	88.71
太湖流域	21.21	45.00	46.33	50.20	14.92
长江中上游	15.04	20.67	13.21	13.00	20.17
九龙江流域	11.27	17.86		26.28	12.73
黑河流域	32.22	15.87	29.22		
长江中上游	4.85	6.28	5.11	3.82	4.83
九龙江流域	11.38	10.92		26.21	13.35

由表 3 可知:①无论是以径流浓度系数还是以单位面积输出负荷系数来衡量,总氮和总磷的输出均相差较大;②以径流浓度输出系数衡量:密云库区居民地氮磷比最高,达 88.71,总氮输出远远超出总磷输出,密云库区耕地氮磷比最低,为 9.82 其他流域的各种土地利用类型氮磷比一般在 10 以上,变化范围较大;③以单位面积输出负荷系数衡量:氮磷比相对比较稳定,一般都在 30 以下,其中长江中上游地区氮磷比均在 10 以下,与径流浓度系数指标的比值结果相差很大;④综合分析两种指标所得的氮磷比可知:耕地的氮磷比与其他四种土地利用类型相

比小而且稳定, 根据不同植被生长对氮磷元素的需求, 各种土地利用类型总氮输出在一定范围内高于总磷是比较正常的, 但过高就可能与氮肥的过量施用等因素有关。

5 结论与展望

我国非点源污染研究起步较晚, 但近年来发展迅速, 不断取得丰硕的成果: 先后对密云水库、三峡库区、太湖流域、九龙江流域、滇池等流域进行了调查研究。本文基于前人研究成果, 对近年来热点研究区域不同土地利用类型的污染物输出系数进行梳理和分析, 得出各流域的氮、磷营养盐平均输出水平, 并分析出流域输出系数特征规律: 不同流域输出系数水平差异较大; 居民地、耕地和园地的非点源污染物输出系数显著高于林地和草地, 同时, 各种土地利用类型氮的输出又远远高于磷的输出。这些结论可为以后的研究中选择合适的输出系数提供参考依据。

输出系数法是当前非点源污染研究领域的基本方法之一, 但由于非点源污染问题的复杂性以及长期监测数据的欠缺, 未来一定时期内, 基础性、系统性的监测与研究工作还有待加强, 以满足我国大尺度流域(区域)非点源污染研究的需要, 并为我国水污染监测与治理提供充分的科学依据。

参考文献:

- [1] Novotny V and O km H. Water quality prevention identification and management of diffuse pollution [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1994.
- [2] 贺瑞敏, 张建云, 陆桂华. 我国非点源污染研究进展与发展趋势[J]. 水文, 2005, 25(4): 10-13.
- [3] 郑一, 王学军. 非点源污染的进展与展望[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 105-110.
- [4] 张秋玲, 陈英旭, 俞巧钢, 等. 非点源污染模型研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1886-1890.
- [5] 薛利红, 杨林章. 面源污染物输出系数模型的研究进展[J]. 生态学杂志, 2009, 28(4): 755-761.
- [6] Lin J P. Review of published export coefficient and event mean concentration (EMC) data[EB/OL][2004]. ERDC TN-WRAP-04-03 U. S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. <http://el.ercdc.usace.army.mil/wrap>, 2004.
- [7] 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

- [8] 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, 35(7): 40-45.
- [9] 龙天渝, 梁常德, 李继承, 等. 基于 SLURP 模型和输出系数法的三峡库区非点源氮磷负荷预测[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3): 574-581.
- [10] 李兆富, 杨桂山, 李恒鹏. 基于改进输出系数模型的流域营养盐输出估算[J]. 环境科学, 2009, 30(3): 668-672.
- [11] 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.
- [12] 梁涛, 张秀梅, 章申, 等. 西苕溪流域不同土地类型下氮元素输移过程[J]. 地理学报, 2002, 27(4): 14-21.
- [13] 梁涛, 王红萍, 张秀梅, 等. 官厅水库周边不同土地利用方式下氮、磷非点源污染模拟研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25(4): 483-489.
- [14] 梁涛, 王浩, 章申, 等. 西苕溪流域不同土地类型下磷素随暴雨径流的迁移特征[J]. 环境科学, 2003, 24(2): 37-42.
- [15] 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.
- [16] 李恒鹏, 刘晓玫, 黄文钰. 太湖流域浙西区不同土地类型的面源污染产出[J]. 地理学报, 2004, 59(3): 401-408.
- [17] 李兆富, 杨桂山, 李恒鹏. 西苕溪流域不同土地利用类型营养盐输出系数估算[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 1-4, 34.
- [18] 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(3): 35-39.
- [19] 洪小康, 李怀恩. 水质水量相关法在非点源污染负荷估算中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2000, 16(4): 384-386.
- [20] 丁晓雯, 刘瑞民, 沈珍瑶. 基于水文水质资料的非点源输出系数模型参数确定方法及其应用[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2006, 42(5): 534-538.
- [21] 鲍全盛, 曹利军, 王华东. 密云水库非点源污染负荷评价研究[J]. 水资源保护, 1997, 13(1): 8-11.
- [22] 王晓峰. 北京市密云水库上游石匣小流域非点源污染特征研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2001.
- [23] 郝芳华, 孙峰, 张建. 官厅水库流域非点源污染研究进展[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 385-386.
- [24] 孙峰, 郝芳华. 基于 GIS 的官厅水库流域非点源污染负荷计算研究[J]. 北京水利, 2004(1): 16-18.
- [25] 王晓燕, 王晓峰, 汪清平, 等. 北京密云水库小流域非点源污染负荷估算[J]. 地理科学, 2004, 24(2): 227-231.

(下转第 99 页)

同理, 由极差分析表可知, 对于水泥模块的结石率, C 因子影响最显著, A 因子次之, B 因子再次之, D 因子影响最小, 最优化条件为 $A_2B_1C_3D_2$ 。

根据数据统计, 采用发泡剂 IV 制得的水泥模块的密度最小, 结石率最大, 是较为理想的水泥发泡剂。并且相比其它两种发泡剂, 采用发泡剂 IV 制得的水泥浆液中的气泡较小, 且较为分散, 浆液析水率很小, 产生的气泡能很好的稳定在水泥浆液当中, 因此固结后的水泥模块能有很小的密度和很高的结石率。例: 采用 $A_2B_1C_2D_3$ 的配方制得的水泥模块, 在标准条件下养护 28 d 后的密度为 0.49 g/cm^3 , 结石率高达 98%。

4 结 语

(1) 一般情况下, 阴离子表面活性剂发泡剂的发泡性能要优于非离子表面活性剂发泡剂, 而阳离子表面活性剂发泡剂起泡性和稳泡性较差, 且毒性较大。因此本次实验选用了四种阴离子表面活性剂发泡剂和一种非离子表面活性剂发泡剂。

(2) 从发泡剂浓度、稳泡剂浓度和矿化度三个方面对 5 种发泡剂进行优选试验, 研究发现发泡剂

IV 起泡和稳泡的综合性能最好, 但其抗 Ca^{2+} 能力不如发泡剂 II 和 V。

(3) 将发泡剂和稳泡剂在水泥浆水灰比 1:1 的条件下进行正交试验, 测定制得的结石体模块的密度和结石率, 表明发泡剂 IV 是较为理想的充气泡沫水泥浆的发泡剂。

参考文献:

- [1] 李爱民, 隆 威. 轻质速凝堵漏注浆材料试验研究 [J]. 混凝土, 2003(4): 33-34
 - [2] 尹 忠, 陈 馥, 梁发书, 等. 泡沫评价及发泡剂复配的实验研究 [J]. 西南石油学院学报, 2004, 26(4): 56-58
 - [3] 高 波, 王群力, 周孝德. 混凝土发泡剂及泡沫稳定性的研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2004(1): 13-16
 - [4] 长春地质学院探工系. 多工艺空气钻进技术 (泡沫钻进部分) [M]. [出版地不详], 1988
 - [5] 刘常旭, 钟 显, 杨 旭. 表面活性剂发泡体系的实验室研究 [J]. 精细石油化工进展, 2007, 8(1): 7-9
 - [6] 万里平, 孟英峰, 赵晓东. 泡沫流体稳定性机理研究 [J]. 新疆石油学院学报, 2003, 15(1): 70-73
 - [7] 李达焕, 许宏武. 钻探试验设计与数据处理 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1991.
-
- (上接第 95 页)
- [26] 庄咏涛. 渭河临潼断面以上流域非点源总氮负荷研究 [D]. 西安: 西安理工大学水利水电学院, 2002
 - [27] 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
 - [28] 李恒鹏, 杨桂山, 黄文钰, 等. 不同尺度流域地表径流氮、磷浓度比较 [J]. 湖泊科学, 2006, 18(4): 377-386
 - [29] 李恒鹏, 杨桂山, 李 燕. 太湖流域土地利用变化的营养盐输出响应模拟 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 179-182
 - [30] 郭红岩, 王晓蓉, 朱建国. 太湖一级保护区非点源磷污染的定量化研究 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(1): 136-140
 - [31] 吴 磊. 三峡库区小江流域非点源污染负荷模拟研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008
 - [32] 刘腊美, 龙天渝, 李崇明, 等. 嘉陵江流域非点源溶解态氮污染负荷模拟研究 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 808-813
 - [33] 郝俊萍. 三峡库区典型小流域非点源污染模拟研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2008
 - [34] 黄金良, 洪华生, 张珺平, 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
 - [35] 黄金良, 洪华生, 杜鹏飞, 等. AnnAGNPS 模型在九龙江典型小流域的适用性检验 [J]. 环境科学学报, 2005, 25(8): 1135-1142