

关键源区识别: 农业非点源污染控制方法

周慧平¹, 高超^{2*}, 朱晓东¹

(1. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室 南京 210093; 2. 南京大学城市与资源学系, 南京 210093)

摘要: 非点源污染的控制难度大、成本高, 必须首先识别流域内的关键源区。对国内外应用的关键源区识别方法从指标筛选、指标体系建立到关键源识别等关键技术环节进行了系统的评述, 以促进该方法在我国农业非点源污染控制中的应用。

关键词: 农业非点源污染; 关键源区; *P* 指数; 流失风险评价

文章编号: 1000-0933(2005)12-3368-07 **中图分类号:** X506, X52 **文献标识码:** A

Identification of critical source areas: an efficient way for agricultural non-point source pollution control

ZHOU Hui-Ping¹, GAO Chao^{2*}, ZHU Xiao-Dong¹ (1. School of the Environment, State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Nanjing University, Nanjing, 210093, China; 2. Department of Urban and Resource Science, Nanjing University, Nanjing, 210093, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(12): 3368~ 3374

Abstract Agricultural non-point source (NPS) pollution, a major factor of the upward trend in the spread of eutrophication of rivers and lakes, has become a pressing environmental concern in many regions of China as well as of the world. NPS pollutants discharged from agricultural land usually have no defined or identifiable point of outfall and enter the aquatic environment system in small quantities at a large number of points. It is therefore extremely difficult to control them by technical measures. Mitigating water quality problems caused by NPS pollution is further complicated if sufficient time and funding are not available to implement all the recommended best management practices (BMPs). In order to achieve the greatest improvement of impaired aquatic environments with limited resources, innovative measures are needed to speed up the restoration processes by treating the pollution sources in order of priority.

The non-point source pollution is not spatially evenly distributed. (Many sources are insignificant, while others contribute substantially to water resource impairment.) In general, almost all NPS pollutants in both surface runoff and subsurface flow originated primarily from only small areas within agricultural watersheds during a few relatively large storm events, because climatic, topographic, hydrologic, pedologic, and agronomic factors often combine to make some non-point sources more detrimental than others to the beneficial use of water resources. These small portions of land comprise the critical source areas (CSAs) that are specific, identifiable, and most vulnerable to pollutants loss. Identifying CSAs and concentrating management efforts on these minimal portions of land are better measures than implementing general strategies over a broad area, since they help ensure that limited available resources are appropriated as efficiently as possible. In this paper, current research progresses related to CSAs identification, both in China and in the world, were reviewed with a purpose to boom the application of this efficient water quality management strategy.

Defining critical NPS areas involves identifying the major pollutant sources and assessing the hydrologic transport system

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (50239030)

收稿日期: 2005-01-31; **修订日期:** 2005-10-15

作者简介: 周慧平 (1978~), 男, 江苏太仓人, 博士生, 主要从事环境规划与管理研究. E-mail: zhouhp-cn@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: chgao@nju.edu.cn

致谢: 感谢挪威奥斯陆大学许崇育教授对本文写作给予的帮助

Foundation item: Key Project of Natural Science Foundation of China (50239030)

Received date: 2005-01-31; **Accepted date:** 2005-10-15

Biography: ZHOU Hui-Ping, Ph. D. candidate, mainly engaged in environmental planning and management. E-mail: zhouhp-cn@yahoo.com.cn

from the sources to the receiving water of concern. A source area that contributed large amounts of pollutants to a waterway often has a significant impact on water resources regardless of the efficiency of the hydrologic system, while the difference in the efficiency of the hydrologic transport system made the delivery of pollutants to aquatic environments from one source much more likely than from the other. Thus, to determine the CSAs, the magnitude of the source and the hydrologic transport system, as well as the coincidence of the two sets of factors must be considered. Among various of NPS pollutants, phosphorus (P) is of particular concern in freshwater systems because it is thought to be the limiting nutrient for eutrophication. Several strategies have been proposed in developed countries as a means of identifying areas within a landscape that are vulnerable to P loss. Approaches such as 'export coefficient', 'multi-criteria analysis' and 'detailed mathematical models' were all adopted to identify CSAs at field and catchment. As the vulnerability of a particular site to pollutants exportation is dependent on numerous factors, multi-criteria analysis approaches designed for application to both field and catchment, utilizing readily accessible information and having also more flexibility for modifications, have been most frequently used as a means of deriving a P loss risk assessment. A typical framework for CSA identification is as follows:

(1) Collecting background information and developing an indicator system followed by determining the related weights and values

(2) Discretizing the study area to small units, within which indicators could be properly quantified

(3) Developing risk assessment index models and calculating the risk indices within each unit

(4) Sorting the risk indices with descending order according to which to determine the critical areas from the index map.

Finally, the advantages and disadvantages of those approaches were discussed together with their applicability at different scales and to different geographical context. Some suggestions were also put forward to improve CSA identification work in China.

Key words: agricultural non-point source pollution; critical source areas; P-index; loss risk assessment

水体富营养化是我国最为突出的环境问题之一。氮、磷等营养物质的输入和富集是水体发生富营养化的主要原因之一。环境中的氮、磷等物质除来源于集中排放的点源之外,非点源尤其是农业非点源污染占有很大的比重^[1-3]。我国尤其是经济快速发展的东南沿海地区,农业非点源污染问题尤为突出,而对于流域养分流失的控制与管理缺乏针对性^[4]。非点源污染发生的广域性、分散性、随机性和低浓度等特征^[5-6]决定了非点源污染物不可能像点源污染物那样能够进行集中处理。技术方法上,非点源污染的治理难度往往更大,需要运用多种手段相结合的方法^[7];治理成本上,要削减相同数量的非点源污染物,所需代价往往要高得多。在非点源污染的危害日益为人们所认识的今天,如何提高非点源污染的治理成效已成为迫切需要解决的课题。充分利用现代科学技术手段,识别流域内污染关键源区(CSAs: Critical Source Areas),从而使控制与管理措施更具针对性,已被公认为是减轻非点源污染危害的关键技术并得到了广泛的应用^[8-13]。

1 识别关键源区的目的意义

非点源污染的发生受土壤、地形、气候、水文、土地利用和管理方式等众多因素的影响,空间差异性非常显著,流域内不同景观单元单位面积的污染负荷差异十分显著^[14,15]。少数景观单元输出的污染物往往占了整个流域污染负荷的大部分^[16],对受纳水体的质量有着决定性的影响,因而成为非点源污染物的关键源区。而大部分景观单元则只输出少量污染物,有些甚至可能成为污染物的汇,即通过景观内部有效的截留和转化,最终输出的污染物数量小于外界输入量。有研究显示,磷的关键源区只占整个流域的一小部分,磷流失量的 90% 来源于 10% 的区域,且主要分布在靠近河流的区域^[16-19]。

由于非点源污染存在这种显著的空间差异性,在制定非点源污染防治规划时,并非一定要在全流域实施全面治理,因为控制非点源污染所采取的最佳管理措施(BMPs: Best Management Practices)需要投入大量的人、财、物力,建立植被缓冲区、树篱等绿色廊道和湿地等生态工程措施还需要占用相当数量的土地资源。对于农业非点源污染,最有效的控制方法是减少农田生态系统的化学品投入,但这一措施往往会以牺牲农产品的产量为代价,因而难以大面积推广。如果首先识别出流域内的污染高负荷区,再根据各区的污染发生风险顺序,将治理重点和有限的资源投入到流域内污染负荷最高,且对水体危害可能性最大而范围相对较小的敏感地区和地段,优先加强管理措施并安排治理工程的布局,则可以提高投资效益并节约土地资源,大大降低污染控制工作的难度,更好地实现预期的治理目标,协调人类开发活动和环境保护工作之间的矛盾。

2 关键源区识别方法

2.1 评价指标的选择

农业非点源污染关键源区的形成受到多种因素的影响,包括土壤理化性质、土地利用、水文、农田耕作方式与肥料、农药使

用数量与方式等。不同污染物由于理化性质和流失过程的差异,其影响因子也有所不同,但可以将其分为源因子和迁移扩散因子两类。源因子主要反映各土地利用方式下土壤中养分含量、肥料输入及土壤对养分的持留能力等,表明是否具有较高的养分输出潜力^[16];迁移扩散因子包括直接和间接影响养分迁移的因子,决定了那些潜力能否转化为实际的流失。

(1) 源因子 源因子主要包括土壤养分含量、农业化学品的施用量、施用方式和时间以及土壤对潜在污染物的固持能力等。土壤养分含量是影响营养物质输出潜力的一个重要因子。土壤中养分含量越高,由地表径流和淋溶带走的养分就越多,形成非点源污染的可能性也就越大。长期过量使用化肥和有机肥,必然使过量养分在土壤中不断富集,增加养分流失的潜在风险。因此,肥料施用的数量和方式的空间差异是确定关键源区的重要因素。土壤对潜在污染物的固持能力主要决定于土壤的理化性质、土壤类型、土地利用方式的空间变化是造成非点源污染物输出量空间差异的重要因素。对于特定的污染物,可以用一些替代指标来表征土壤的固持能力,如利用磷吸持指数来评价不同类型土壤中的磷向水体释放的风险^[20, 21]。

(2) 迁移扩散因子 迁移扩散因子主要包括土壤侵蚀、地表径流、农田与河流的距离及水体的连通性等。土壤侵蚀与非点源污染是一对密不可分的共生现象,土壤侵蚀往往是污染物流失的主要发生形式,且与被侵蚀的地表土壤相比,侵蚀泥沙中的养分往往会有较明显的富集现象^[22]。地表径流是造成土壤侵蚀的主要驱动力,地表径流越大,除了增加土壤侵蚀,以泥沙方式带走更多的养分外,也造成径流中溶解态养分流失量的增加。径流和土壤侵蚀的强度主要是由降雨强度与历时、地形、耕作方式以及土壤物理特性等因素所决定的,因此为识别关键源区而建立相应的指标体系时,通常以这些因素作为衡量其影响程度的替代指标。非点源污染物在从源区向受纳水体迁移的过程中,由于生物吸收、物理截留和化学反应(如磷的沉淀反应和氮的反硝化等),浓度将不断降低。迁移距离越远,对受纳水体的影响也就越小,因而距离河流较远的物源区对非点源污染贡献的重要性一般要小于距离较近的地区^[23, 24]。Gburek 等人^[25]结合水文学中普遍使用的重现期与径流峰值之间的相互关系,建立了重现期与贡献距离之间的定量关系。重现期越短,暴雨径流的贡献距离和面积越小,而发生的频率越大,对水体形成危害的可能性就越大。除了农田与水体的距离,它们之间的连通性也是影响非点源污染物迁移的重要因素^[26]。所谓连通性就是指地块与受纳水体之间有无缓冲隔离带或是排水沟等异质景观。植被缓冲区或湿地景观必然减少它们之间的连通性,形成物理障和生物地球化学障^[27, 28],通过对污染物的阻截、吸收、沉淀、降解等途径减小污染物对水体的影响^[29-32];相反,排水沟则会增加连通性,加速营养物质向水体的迁移。

2.2 指标体系的建立

研究农田土壤养分流失潜力,土壤养分水平是一个重要指标。而目前用来表征土壤养分含量的标准测定方法,主要是用来衡量土壤对作物的供应能力,也有进行改进并用来研究其环境行为和评价其潜在流失的强度^[33]。Sharpley^[34]认为土壤磷饱和度(DSSP: Degree of Soil Saturation with Phosphorus)能够比土壤磷含量、磷吸附能力更好地估算磷的流失潜力,这也得到了Hooda 等人^[35]的证实。在地块尺度上,土壤养分含量及其阈值具有一定的意义,而在流域尺度上,由于农田土壤养分的流失具有众多的影响因素,要圈定污染关键源区,仅根据上述几种土壤指标来评价特定地区土壤养分潜在的流失强度不能反应问题的实质^[36],而需要建立一套较为全面的评价指标体系。

针对农田生态系统磷的流失,Lenbury 和 Gilbert^[37]提出了土壤磷流失的敏感性评价指标体系来评价养分磷的潜在流失风险,用磷指数法(P I: Phosphorus Index),以敏感性指数来半定量地描述农业非点源污染潜在风险的空间分布。该方法综合考虑了影响磷流失的源因子(土壤磷素水平、化肥与有机肥磷的施用量、施用方式、时间)和迁移扩散因子(土壤侵蚀、沟灌侵蚀、径流强度等)。Magette^[38]在磷指数基础上,在流域尺度上评价磷的流失风险指数时首先考虑了污染源距水体的距离。随后,Gburek 等^[25]对磷指数法的指标体系进行了完善,考虑了农业区距水体距离对养分非点源污染的影响,将“重现期”的概念与“农田距水体距离”因子纳入系统化的指标体系。对于不同地区、不同的农田特征及管理方式,评价养分磷的流失风险时可采用不同的指标。美国宾夕法尼亚州磷指数的迁移因子中应用了淋溶潜力及源区与水体连通性指标,并将各个指标根据其最大潜力进行标准化^[39]。纽约州磷指数区分了颗粒态磷与溶解态磷的流失,以评价土地管理对不同形态磷素流失的影响,在溶解态磷的迁移因子中强调了土壤排水因子,而颗粒态迁移因子中突出了土壤侵蚀因子的作用^[40, 41]。马里兰州磷指数的迁移因子中,又应用了亚表层排水及受纳水体类型因子,来识别养分流失对不同水质要求的水体的重要性^[42]。Heathwaite 等^[43]人提供了一个应用于欧洲农业背景下的磷流失风险评价的决策支持框架,提出了适用于欧洲的磷指数评价指标体系,增加了区域土壤有机质含量、土壤磷饱和度、与寒冷气候相关的作物管理等指标。Hughes^[44, 45]将Magette 的磷分级系统^[38](PRS: Phosphorus Ranking System)拆分为地块 PRS 和集水区 PRS,两种尺度下采用了不同的指标体系,使其更有效的应用于不同尺度下的磷流失风险评价。另一方面,由于不同养分元素在土壤中的形态特性、迁移扩散方式不同,评价其流失潜力时也应选取不同的指标进行评价。如对于氮的流失,源因子与磷基本相同,最大的区别在于对于迁移因子,氮的流失受土壤侵蚀因子的影响较小,而受土壤渗透和地下水运动的影响较大,因此,地下水运动和淋溶潜力应作为重要的迁移因子纳入评价指标体系。

不同的地区受到不同的自然条件和人类活动的影响,各个指标对养分流失的重要性各不相同,而同一指标对不同养分流失

的重要性也存在差异,在评价指标体系中应赋予不同的权重。权重的赋值目前较多采取专家评判的方法,但具有一定的主观性影响,应根据实地监测的结果作相应的校准,使评价的指标以及对应的权重能够恰当地反应各指标的相对贡献。各个影响因子一般分为 5 个等级(无、低、中、高、极高),基于当地的实际资料采用专家评判法分别赋予不同的值,不同的指数系统,各个等级的赋值形式、大小可能不同^[25, 37, 39-45]。

2.3 关键源区识别的技术方法

农业非点源污染关键源区的识别包括两层内容,一是在整个流域内识别农业非点源污染发生风险高的区域,再根据区内的实际情况,安排治理工程的布局,采取针对性的调控措施,以便提高投资效益和治理成效,达到事半功倍的效果。另一层内容是圈定景观中最易产生污染物的地段和部位。在这些地段,由于受地形和耕作措施等因素的影响,土壤的水分状况和抗蚀能力与其它地段有显著差别,营养元素容易随径流和淋溶水流失,景观中输出的非点源污染物主要来自这些地段^[16]。在进行农事活动的安排时就可针对这一特点采取相应的对策,减少水土和养分的流失。

(1) 输出系数法 输出系数法通过野外小型观测试验,分析各类景观及集水区特征与地表水污染物浓度之间的关系,确定各类景观中单位面积或单位时间的污染物输出系数,建立污染物输出与景观特征的相关函数,然后应用于较大范围或具有类似景观特征的集水区或流域。Daly^[46]等综合了土壤类型与磷素水平以及农业土地利用,环境数据建立了爱尔兰国家磷模型, PLOAD^[47]是 USEPA 开发的 BASINS 系统中用来计算流域非点源污染年负荷量的模型。计算公式为:

$$L_P = \sum_U (0.01 \times P \times P_f \times R_{vu} \times C_U \times A_U)$$

式中, L_P 为污染负荷(kg); p 为降雨量(mm/a); P_f 为暴雨产流率; R_{vu} 为土地利用类型 U 的平均径流系数; C_U 为土地利用类型 U 下的污染物径流量加权平均浓度(mg/L); A_U 为土地利用类型 U 的土地面积(hm²)。该方法通过计算流域中不同土地利用类型的污染物年负荷量,找出污染负荷量大的流域或流域的重要部位^[48, 49]。

(2) 多因子综合分析法 该方法综合分析影响污染物流失的主要因子,通过对各因子分级赋值并赋予不同的权重,以数学关系综合成一个多因子判别模型,对流域内的污染关键源区进行识别。目前,采用半定量指数模型结合 GIS 技术是进行关键源区识别的重要方法。利用 GIS 的空间数据处理能力来处理流域非点源污染的空间变异性问题,可以方便地实现养分流失关键源区的识别以及对流域非点源污染的评价。基本的研究步骤为: 收集研究区背景资料及现场实测资料,数据,根据研究区特征筛选,确定与非点源污染流失关系最密切的因子作为评价指标,建立分类(如源因子、迁移因子)指标体系,根据各个指标的调查资料确定权重与等级值。根据精度要求与资料条件,采用空间离散化方法^[50]将研究区划分为性质相近、面积较小的地理单元(子流域^[37]或较小的地理网格^[13]),对各个地理单元内的各项参数指标进行量化识别。根据土壤性质、所在单元与河道或湖泊的距离、地形坡度以及土地利用方式等特征,建立非点源污染指数模型,对各地理单元内的非点源污染发生风险进行量化。输出流域非点源污染物流失风险指数图,将所有单元的污染指数排序,可以圈定出那些污染发生的关键源区。

Lemunyon 等^[37]建立的农田尺度磷流失综合指数按如下公式进行计算:

$$PI = (W_i \times V_i)$$

式中, W_i 为各个影响因子(包括源因子和迁移扩散因子)的权重, V_i 为各因子的等级值。Sharpley^[51]应用 PI 在 30 个农田小流域的研究显示,磷的流失指数等级与总磷流失量有较好的相关性。然而应用于较大的流域时, PI 不能很恰当的反映源因子与迁移因子的共同作用造成的实际流失对水体的影响。Gburek 等^[25]将源因子与迁移因子两项分别计算,避免了因缺少重要迁移因子而造成综合指数与实际流失风险不符,将所有潜在的流失风险当成实际的流失风险。改进后的综合指数为:

$$PI = \left[(W_{si} \times V_{si}) \right] \times \left[(W_{ti} \times V_{ti}) \right]$$

式中,下标 si 为源因子, ti 为迁移因子。

Petersen 等^[52]建立了一个用于较大区域尺度的农业非点源污染潜力指数系统(A PPI: Agricultural Pollution Potential Index),并结合 GIS 技术来评价宾夕法尼亚州不同流域农业非点源污染发生的潜力,识别污染流失的重点发生区。A PPI 指数系统包括 4 个分指数:泥沙输出指数(SPI)、径流指数(RI)、禽畜负荷指数(ALI)、化肥利用指数(CUI),同样也考虑了污染物的产生与迁移过程:

$$APPI_i = SPIW_1 + RIW_2 + ALIW_3 + CUIW_4$$

式中, i 为各个子流域, W 为各指标权重。

SPI 采用 RUSLE 模型计算土壤流失量,结合泥沙输移率计算潜在的泥沙负荷量;RI 采用 SCS-CN 法计算地表径流量;ALI 根据各类禽畜数量和负荷系数估算总负荷量;而 CUI 则在农业区各类土地利用类型下,分别对潜在的氮、磷、农药负荷量分为高、中、低、无 4 个等级,将各项等级值相加获得 CUI 指数。各项分指数最终都经过标准化处理后汇总为一个综合指数,通过排序即可以圈定出污染流失潜力较大的关键区域。

(3) 机理模型模拟 20 世纪 70 年代中后以来, CREAM S, ANSWERS, HSPF, AGNPS 等这些尺度和功能各异的机理型非点源污染模型被研制开发^[53]; 随着 3S 技术广泛应用于流域研究, 一些集空间信息处理、数据库技术、数学计算与可视化表达功能于一身的大型流域模型, 如 SWAT、BASINS 和 AGNPS98 等, 也广泛应用于农业非点源污染研究^[54, 55]。这类模型通过对污染物的迁移路径、转化过程机理及输出的连续模拟, 可找出污染发生的时间与重点区域。

此外, 还有不少学者从不同角度进行了非点源污染关键源区的相关研究。由于土壤流失严重的地区往往也是农业非点源污染的关键源区^[8], 因而土壤侵蚀模型常常被作为寻找非点源污染关键源区的主要工具, 许多非点源模型都从 USLE 模型演变而来。Sivertun 等^[13]在 USLE 方程的基础上进行了修改, 建立了一个识别非点源污染流失的风险模型, 结合 GIS 技术分析了 Gissel 流域的非点源污染关键源区。Fargas 等^[10]将排水密度和地表岩性作为主要因子来估算泥沙侵蚀的风险, 在区域尺度上对泥沙侵蚀的关键源区进行了识别。Pönke 等^[56]在 30a 的试验与观测资料的基础上, 结合土地利用、水文过程、土壤磷状况、氮平衡等, 对宾夕法尼亚州一典型农业山地流域氮、磷输出的关键源区进行了识别与分析。Tim 等^[57]将 AGNPS 水文/水质模型与 ARC/INFO 系统相结合, 评价在污染主要发生区设立缓冲区的不同带宽和不同设立方式(沿主要水体全程设立或仅在重点地段设立)对去除污染物效果的影响, 并提出多种方案以供选择。Narumalani 等^[58]则利用 TM 遥感数据和 GIS 技术在大尺度上确定需要设立缓冲区保护的污染高风险区, 为土地利用规划和环境管理工作提供科学依据。最近, Heathwaite^[59]等人采用水流路径模拟工具 TopManage 综合土地利用和径流特征及现有的指数方法(如 P 指数法)来识别 CSAs, 通过评价不同土地管理方式下养分输出对受纳水体相对风险进行土地利用决策。国内刘枫等^[60]较早地介绍了量化识别非点源污染发生时空规律及严重发生区的方法。林昭远等^[61]采用 RS、GIS 建立了集水区农业非点源污染评估系统, 划定集水区环境敏感区。张淑荣等^[19]在 GIS 支持下建立了评价指标体系, 对于桥水库流域农业非点源磷污染潜在的危险性进行了评价。

3 讨论

关键源区识别是非点源污染管理的重要组成部分。采取哪种识别方法主要取决于研究区的实际情况及资料的可获得性。上述研究方法在实际应用中各自都存在一定的优缺点, 具有不同的适用性。输出系数法是一种经验统计模型, 其通用性稍差。一个地区的输出系数用于相似特征的其它地区也可能会产生较大的误差^[62]。它应用于资料缺乏, 对精度要求不高的情况。多因子综合分析法能够为某一区域养分流失风险提供一个更为合理的评价框架, 不仅可以充分利用现有的数据, 而且评价指标系统具有很强的灵活性与应变能力, 可根据研究区的特征进行修改, 以适应不同地区非点源污染流失风险的评价工作。如磷指数决策系统框架的开发与发展就始终体现了这些特点。采用目前的 PI 和 $APPI$ 两种指数系统进行非点源污染关键源区识别的相同之处在于: 它们都利用了 GIS 技术将研究区划分为较小的地理单元, 并在各个单元内获取参数和进行分指数计算。最后得到的污染风险指数并不是非点源污染物的实际发生量, 而是表示流失风险的一无量纲值。而不同之处在于: $APPI$ 指数未考虑源因子与迁移因子的共同作用的重要性, 未考虑污染源对水体的影响程度。 $APPI$ 指数可应用于较大的尺度, 识别非点源污染发生的重点流域, 而 PI 指数主要用于识别流域中非点源污染发生的重点部位。相比之下, 基于过程的机理模型的模拟虽然可以得到实际的污染物流失量且有较高的精度, 但过程复杂, 模型参数众多, 通常需要气候、水文、地形、土壤物理化学属性等详细的数据资料, 对数据资料的种类和精度都有很高的要求, 需要花费大量的人力和财力进行收集, 在许多资料缺乏地区往往难以有效地应用。

目前, 应用多因子综合分析框架来识别关键源区已有越来越多的应用, 具体的方法也不断得到改进, 但主要集中于评价指标及权重的修改以适应不同的地区, 而对于综合评价模型的适用性研究或模型修改则未见报道。由于最终的评价指数根据一定的范围划分风险等级, 如何合理地确定一个划分标准并且对最终的结果进行验证还有待进一步研究。然而这些工作需要两个重要条件^[39, 45]: 与污染物输出有着时间上联系和空间上相关的大量土壤、土地利用等样本数据信息; 依据受纳水体状况而制定的污染物最大负荷量。而要在流域范围内获取以上信息相当困难, 这在一定程度上阻碍了风险评价的验证和方法改进工作。

4 结语

我国的农业非点源污染已导致越来越突出的水环境问题, 加强非点源污染的研究和控制十分迫切。在环保投资有限的情况下, 应用多种方法开展非点源污染关键源区识别具有重要的理论意义和实践指导意义, 而目前这方面的研究和实践工作都十分薄弱。大量研究结果已经证实, 风险指数系统应用于农业非点源控制在理论和实践上是可行的, 虽然这类指数定级方法在指标、权重与分等定级的确定, 以及模型的验证上还有待于进一步探索和完善, 但其综合考虑影响污染物流失的主要影响因素, 并根据污染流失风险指数对污染源划分等级从而分别管理的思想是值得借鉴的。且该方法具有很强的灵活性, 在有限资料的条件下, 通过对指数系统进行适当修改, 可以较好地应用于具有不同自然地理特征的地区, 进而识别流域内的关键源区。今后, 我国应在国外相关研究的基础上, 针对各地区的非点源污染特点, 在评价指标体系的完善和方法模型的改进与验证上进行重点研究。此外还需要在计算机技术辅助决策、特别是 EIS 和 GIS 的耦合研究及应用于农业非点源养分管理与决策方面开展大量细致而深入的工作, 以增强该方法的实际应用效果。

References

- [1] Daniel T C, Sharpley A N, Lemunyon J L. Agricultural phosphorus and eutrophication: A symposium overview. *J. Environ. Qual*, 1998, **27**: 251~ 257.
- [2] Van der Molen D T, Breeuwsma A, Boers P C M. Agricultural nutrient losses to surface water in the Netherlands: impact, strategies, and perspectives. *J. Environ. Qual*, 1998, **27**: 4~ 11.
- [3] Quan W M, Yan L J. Effects of agricultural non-point source pollution on eutrophication of water body and its control measure. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(3): 291~ 299.
- [4] Wang D H, Liang C H. Transportation of agricultural phosphorus and control to reduce the phosphorus loss to water: A review. *J. Soil & Environ.*, 2002, **11**(2): 183~ 188.
- [5] He C S, Fu B J, Cheng L D. Non-point source pollution control and management. *J. Environ. Sci*, 1998, **19**(5): 87~ 91.
- [6] Wang X Y. *Non-point source pollution and management*. Beijing: Ocean Press, 2003.
- [7] Gao C, Zhu J Y, Dou Y J, et al. Landscape management practices for the control of non-point source pollution: methods and principals. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(1): 109~ 116.
- [8] Maas R P, Smolen M D, Dressing S A. Selecting critical area for non-point source pollution control. *J. Soil Water Conser.*, 1985, **40**(1): 68~ 71.
- [9] Hamlett J M, Miller D A, Day R L, et al. Statewide GIS-based ranking of watersheds for agricultural pollution prevention. *J. Soil Water Conser.*, 1992, **47**(5): 399~ 404.
- [10] Fargas D, Casasnovas J A M, Poch R. Identification of critical sediment source areas at regional level. *Phys. Chem. Earth*, 1997, **22**: 355~ 359.
- [11] Endreny T A, Wood E F. Distributed watershed modeling to identify critical nonpoint source loading areas. *J. Environ. Qual*, 1999, **28**: 388~ 396.
- [12] Endreny T A, Wood E F. Watershed weighting of export coefficients to map critical phosphorous loading areas. *J. American Water Resources Association*, 2003, **39**(1): 165~ 181.
- [13] Sivertun A, Prange L. Non-point source critical area analysis in the Gissel watershed using GIS. *Environmental Modelling & Software*, 2003, **18**: 887~ 898.
- [14] Marsh W M. *Landscape planning: Environmental applications*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [15] Gao C, Zhu J G, Zhu J Y, et al. Nitrogen export from an agriculture watershed in the Taihu Lake area, China. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, **26**: 199~ 207.
- [16] Gburek W J, Sharpley A N. Hydrology control on phosphorus loss from upland agricultural watersheds. *J. Environ. Qual*, 1998, **27**: 267~ 277.
- [17] Pionke H B, Hoover J R, Schnabel R R, et al. Chemical-hydrologic interaction in the near-stream zone. *Water Resour. Res.*, 1988, **24**(7): 1101~ 1110.
- [18] Pionke H B, Gburek W J, Sharpley A N, et al. Hydrologic and chemical controls on phosphorus loss from catchments. In: Tunney H, et al. eds. *Phosphorus Loss from Soil to Water*. Cambridge, UK: CAB International Press, 1997. 225~ 242.
- [19] Zhang S R, Cheng L D, Fu B J, et al. The risk assessment of non-point pollution of phosphorus from agricultural lands: a case study of YuQiao reservoir watershed. *Quaternary Sci*, 2003, **23**(3): 262~ 269.
- [20] Gao C, Zhang T L, Wu W D. Risk evaluation of agricultural soil phosphorus release to the water bodies. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, **21**(3): 344~ 348.
- [21] Bache B W, Williams E G. A phosphate sorption index for soils. *J. Soil Science*, 1971, **22**(3): 288~ 301.
- [22] Sharpley A N. The selective erosion of plant nutrients in runoff. *Soil Sci Soc. Am. J.*, 1985, **49**: 1527~ 1534.
- [23] Johnes P J, Heathwaite A L. Modelling the impact of land use change on water quality in agricultural catchments. *Hydrol. Proc.*, 1997, **11**: 269~ 286.
- [24] Heathwaite L, Sharpley A N, Gburek W J. A conceptual approach for integrating phosphorus and nitrogen management at watershed scales. *J. Environ. Qual*, 2000, **29**: 158~ 166.
- [25] Gburek W J, Sharpley A N, Heathwaite L, et al. Phosphorus management at the watershed scale: a modification of the phosphorus index. *J. Environ. Qual*, 2000, **29**: 130~ 144.
- [26] Schoumans O F, Breeuwsma A. The relationship between accumulation and leaching of phosphorus: Laboratory, field and modeling results. In: Tunney H, et al. eds. *Phosphorus Loss from Soil to Water*. Cambridge, UK: CAB International Press, 1997. 361~ 363.
- [27] Ryszkowski L, Bartoszewicz A, Kedziora A. Management of matter fluxes by biogeochemical barriers at the agricultural landscape level. *Landscape Ecol.*, 1999, **14**: 479~ 492.
- [28] Muscutt A D, Harris G L, Bailey S W, et al. Buffer zones to improve water quality: a review of their potential use in UK agriculture. *Agr. Ecosyst. and Environ.*, 1993, **45**: 59~ 77.
- [29] Hefting M M, de Klein J J M. Nitrogen removal in buffer strips along a lowland stream in the Netherlands: a pilot study. *Environ. Pollut.*, 1998, **102**: 521~ 526.
- [30] Blackwell M S A, Hogan D V, Maltby E. The use of conventionally and alternatively located buffer zones for the removal of nitrate from diffuse agricultural runoff. *Wat. Sci. Tech.*, 1999, **39**(12): 157~ 164.
- [31] Gopal B. Natural and constructed wetlands for waste water treatment: potentials and problems. *Wat. Sci. Tech.*, 1999, **40**(3): 27~ 35.
- [32] De Laney T. Benefits to downstream flood attenuation and water quality as a result of constructed wetlands in agricultural landscapes. *J. Soil Water Conser.*, 1995, **50**: 620~ 626.
- [33] Sims J T. Soil testing for phosphorus: environmental uses and implications. A Publication of SERA-IEG 17, USDA-CRSREES Regional Committee: *Minimizing Agricultural Phosphorus Losses for Protection of the Water Resource*, 1998. 21~ 29.
- [34] Sharpley A N. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus. *J. Environ. Qual*, 1995a, **24**: 920~ 926.
- [35] Hooda P S, Rendell A R, Edwards A C, et al. Relating soil phosphorus indices to potential phosphorus release to water. *J. Environ. Qual*, 2000, **29**: 1166~ 1171.
- [36] Sharpley A N, Tunney H. Phosphorus research strategies to meet agricultural and environmental challenges of the 21st century. *J. Environ. Qual*, 2000, **29**: 176~ 181.

- [37] Lemunyon J L, Gilbert R G. The concept and need for a phosphorus assessment tool. *J. Prod. Agric.*, 1993, **6**(4): 483~ 486
- [38] Magette W L. Factors affecting losses of nutrients from agricultural systems and delivery to water resource. In: Carton O T. ed. *Draft guideline for nutrient use in intensive agricultural enterprises*. Teagasc Johnstown Castle Res. and Dev. Centre Wexford, Ireland, 1998. 6~ 31.
- [39] Sharpley A N, McDowell R W, Weld J L, et al. Assessing site vulnerability to phosphorus loss in an agricultural watershed. *J. Environ. Qual.*, 2001, **30**: 2026~ 2036
- [40] Czymmek I K J, et al. The New York phosphorus runoff index: user's manual and documentation. Cornell University, Ithaca, NY 14853, July 2003
- [41] Bryant R, Reid S, Kleinman P J A, et al. Phosphorus and agriculture V: The New York P Index. *What's cropping up?* 2002, **10**: 4~ 5
- [42] Coale F J, Sims J T, Leytem A B. Accelerated deployment of an agricultural nutrient management tool: The Maryland Phosphorus Site Index. *J. Environ. Qual.*, 2002, **31**: 1471~ 1476
- [43] Heathwaite A L, Sharpley A N, Bechmann M. The conceptual basis for a decision support framework to assess the risk of phosphorus loss at the field scale across Europe. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2003, **166**: 447~ 458
- [44] Hughes K, Magette W, Kurz I. Calibration of the Magette phosphorus ranking scheme: a risk assessment tool for Ireland. International Water Association, Diffuse Pollution Conference Proceedings, Dublin, 2003
- [45] Hughes K, Magette W, Kurz I. Identifying critical source area for phosphorus loss in Ireland using field and catchment scale ranking schemes. *J. Hydra.*, 2005, **304**: 430~ 445
- [46] Daly K, Coulter B, Mills P. National phosphorus model, Quantification of Phosphorus Loss from Soil to Water: Final Report and Literature Review. Environmental Protection Agency, Johnstown Castle, Co. Wexford, Ireland, 2000
- [47] USEPA. PLOAD version 3.0. An ArcView GIS Tool to Calculate Nonpoint Sources of Pollution in Watershed and Stormwater Projects, User's Manual, January, 2001.
- [48] Zhou H P, Ge X P, Xu Y P, et al. Application of GIS to non-point source pollution evaluation. *Advances in Water Sci.*, 2004, **15**(4): 441~ 444
- [49] Cui G, Zaheer I, Luo J. Quantitative Evaluation of Non-point Pollution of Taihu Watershed Using Geographic Information System. *Journal of Lake Sciences*, 2003, **15**(3): 236~ 244
- [50] Wang Z G, Liu C M, Wu X F. A review of the studies on distributed hydrological model based on DEM. *J. Natural Resources*, 2003, **18**(2): 1~ 6
- [51] Sharpley A N. Identifying sites vulnerable to phosphorus loss in agricultural runoff. *J. Environ. Qual.*, 1995b, **24**: 947~ 951
- [52] Petersen G W, Hamlett J M, Baumer G M, et al. Evaluation of agricultural nonpoint pollution potential in Pennsylvania using a geographic information system. Prepared for the Pennsylvania Department of Environmental Resources, Bureau of Soil and Water Conservation. Environmental Resources Research Institute. University PARK, PA, 1991.
- [53] USEPA. Exposure Models Library and Integrated Model Evaluation System [R]. EPA/600/C-92/002, 1996
- [54] Tripathi M P, Panda R K, Raghuwanshi N S. Identification and prioritization of critical sub-watersheds for soil conservation management using the SWAT model. *Biosystems Engineering*, 2003, **85**(3): 365~ 379
- [55] Hassen M, Fekadu Y, Gete Z. Validation of agricultural non-point source (AGNPS) pollution model in Kori watershed, South Wollo, Ethiopia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2004, **6**: 97~ 109
- [56] Pionke H B, Gburek W J, Sharpley A N. Critical source area controls on water quality in an agricultural watershed located in the Chesapeake Basin. *Ecological Engineering*, 2000, **14**: 325~ 335
- [57] Tim U S, Jolly R, Liao H. Impact of landscape feature and feature placement on agricultural non-point source pollution control. *Journal of Water Resource Planning and Management*, 1995, **121**(6): 463~ 470
- [58] Narumalani S, Zhou Y, Jensen J R. Application of remote sensing and geographic information systems to the delineation and analysis of riparian buffer zones. *Aquatic Botany*, 1997, **58**: 393~ 409
- [59] Heathwaite A L, Quinn P F, Hewett C J M. Modelling and managing critical source areas of diffuse pollution from agricultural land using flow connectivity simulation. *J. Hydra.*, 2005, **304**: 446~ 461
- [60] Liu F, Wang H D, Liu P T. Quantification and identification of non-point source pollution in watershed and the application in YuQiao reservoir watershed. *Acta Geographica Sinica*, 1988, **43**(4): 329~ 339
- [61] Lin Z Y, Chen J X, Yan Z P. Assessment and strategies for watershed agricultural non-point source pollution control. *Research of Soil and Water Conser.*, 2001, **8**(1): 7~ 9, 16
- [62] Irvine K, Donohue I, Wemaere A, et al. Connecting land-use with water quality: source, sinks and time-bombs. International Water Association, Diffuse Pollution Conference Proceedings, Dublin 2003

参考文献:

- [3] 全为民, 严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施. *生态学报*, 2002, **22**(3): 291~ 299
- [4] 王道涵, 梁成华. 农业磷素流失途径及控制方法研究进展. *土壤与环境*, 2002, **11**(2): 183~ 188
- [5] 贺维生, 傅伯杰, 陈利顶. 非点源污染的管理及控制. *环境科学*, 1998, **19**(5): 87~ 91
- [6] 王晓燕. 非点源污染及其管理. 北京: 海洋出版社, 2003
- [7] 高超, 朱继业, 窦贻俭, 等. 基于非点源控制的景观格局优化方法与原则. *生态学报*, 2004, **24**(1): 109~ 116
- [19] 张淑荣, 陈利顶, 等. 农业区非点源污染潜在危险性评价—以于桥水库流域磷流失为例. *第四纪研究*, 2003, **23**(3): 262~ 269
- [20] 高超, 张桃林, 吴蔚东. 农田土壤中的磷向水体释放的风险评价. *环境科学学报*, 2001, **21**(3): 344~ 348
- [48] 周慧平, 葛小平, 许有鹏, 等. GIS在非点源污染评价中的应用. *水科学进展*, 2004, **15**(4): 441~ 444
- [49] 崔广柏, 扎黑尔, 罗建. 利用GIS定量评价太湖流域的非点源污染. *湖泊科学*, 2003, **15**(3): 236~ 244
- [50] 王中根, 刘昌明, 吴险峰. 基于DEM的分布式水文模型研究综述. *自然资源学报*, 2003, **18**(2): 1~ 6
- [60] 刘枫, 王华东, 刘培桐. 流域非点源污染的量化识别方法及其在于桥水库流域的应用. *地理学报*, 1988, **43**(4): 329~ 339
- [61] 林昭远, 陈键鑫, 颜正平. 集水区农业非点源污染之评估及控制对策. *水土保持研究*, 2001, **8**(1): 7~ 9, 16