农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

磷指数模型在美国的应用和发展

马华, 雷秋良, 杜新忠, 赵营, 李影, 安妙颖, 武淑霞, 樊秉乾, 刘宏斌

引用本文:
马华, 雷秋良, 杜新忠, 赵营, 李影, 安妙颖, 武淑霞, 樊秉乾, 刘宏斌. 磷指数模型在美国的应用和发展[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 965-973.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0592

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

典型双季稻田施磷流失风险及阈值研究
朱坚, 纪雄辉, 田发祥, 吴家梅, 刘昭兵, 彭华, 柳赛花, 官迪, 谢运河
农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1425-1433 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0314

畜牧粪便堆沤过程中磷素转化与流失风险分析
金文博, 殷长青, 王毅, 左双苗, 肖润林
农业环境科学学报. 2018, 37(9): 2037-2044 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1567

岷江上游典型土壤磷的迁移特性研究
徐光荣, 张世熔, 钟钦梅, 王贵胤
农业环境科学学报. 2018, 37(8): 1741-1747 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1776

农田化肥氮磷地表径流污染风险评估
孙铖, 周华真, 陈磊, 沈珍瑶
农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1266-1273 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0800

不同农艺管理措施下双季稻田氮磷径流流失特征及其主控因子研究
杨坤宇, 王美慧, 王毅, 尹黎明, 李勇, 吴金水
农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1723-1734 https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0609

关注微信公众号，获得更多资讯信息

马华, 雷秋良, 杜新忠, 等. 磷指数模型在美国的应用和发展[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 965-973.
MA H, LEI Q L, DU X Z, et al. Review on development of phosphorus indices in the United States[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(5): 965-973.

开放科学 OSID

磷指数模型在美国的应用和发展

马华[1], 雷秋良[1*], 杜新忠[1], 赵营[2], 李影[3], 安妙颖[1], 武淑霞[1], 樊秉乾[1], 刘宏斌[1]

(1.农业农村部面源污染控制重点实验室/北京昌平土壤质量国家野外科学观测研究站/北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室,中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2.宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 银川 750002; 3.中国科学院地理科学与资源研究所,资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

摘　要:磷是植物生长必需的营养元素之一,在农业生产中起着关键作用。然而,长期过量的磷肥投入导致土壤磷素水平增加,进而加大了土壤磷素流失风险,造成农业非点源磷污染,同时这也成为导致水体富营养化的主要因素之一。因此,识别和管理农业非点源磷的流失风险关键区,成为面源污染亟待解决的关键问题。磷指数模型起源于20世纪90年代,是评估农田磷流失潜力和指导磷管理决策的重要工具之一。根据研究区特点,美国众多学者在各州设立了不同的磷指数指标体系,优化了磷指数的组成因子、计算方法和分级标准。本文对美国各州磷指数模型评价体系进行了综述和评价,指出了磷指数模型的局限性,提出了改进方向,以期为我国磷素管理方法提供借鉴。

关键词:磷指数;非点源污染;磷素迁移;评价体系;流失风险
中图分类号:X52;X71　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1672-2043(2024)05-0965-09　　doi:10.11654/jaes.2023-0592

Review on development of phosphorus indices in the United States

MA Hua[1], LEI Qiuliang[1*], DU Xinzhong[1], ZHAO Ying[2], LI Ying[3], AN Miaoying[1], WU Shuxia[1], FAN Bingqian[1], LIU Hongbin[1]

(1. Key Laboratory of Non-point Source Pollution Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/ Changping Soil Quality National Observation and Research Station /State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Science, Yinchuan 750002, China; 3. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Phosphorus is a necessary nutrient for plant growth and plays a key role in agricultural production. With the increasing risk of phosphorus loss from soil to water, agricultural non-point source phosphorus pollution has become the main cause of water eutrophication. Determining how to identify and manage the key areas of agricultural non-point source phosphorus loss risk has become an urgent problem to be solved. The phosphorus index method is a tool used to assess the phosphorus loss potential of farmland and guide phosphorus management decisions. It has been applied in the United States since the 1990s. In its subsequent applications, states in the United States, as well as other countries and regions, established different index systems according to local characteristics and optimized their component factors, calculation methods, and grading standards. This review analyzes and comments on the constituent factors, calculation methods, and classification standards of all American states. It also discusses the direction of future improvements against the limitations of the phosphorus index method to provide a reference for phosphorus management in China.

Keywords: phosphorus index; non-point source pollution; phosphorus transport; evaluation system; loss risk

收稿日期:2023-07-24　　**录用日期:**2023-10-20
作者简介:马华(1998—),女,宁夏银川人,硕士,主要从事农业面源污染的模型模拟研究。E-mail:82101215221@caas.cn
***通信作者:**雷秋良　E-mail:leiqiuliang@caas.cn
基金项目:国家自然科学基金项目(U20A20114,42107076);国家高技术研究发展计划项目(2022YFC3204001);国家留学基金委项目
Project supported: National Natural Science Foundation of China (U20A20114, 42107076); National High Technology Research and Development Program of China(2022YFC3204001); China Scholarship Council

磷是植物生长所必需的营养元素之一，在农业生产中起着关键作用[1]。然而，农业生产中过量的磷素可在降雨、径流、灌溉排水等自然与人为活动因子驱动下，进入湖泊、河流等受纳水体，引起农业面源污染和水体富营养化[2-4]。农业面源污染具有空间分布广泛性、不确定性等特点。因此，如何识别面源磷流失潜在高风险区是当前研究热点[5-6]。在对磷污染研究的众多模型中，磷指数模型（Phosphorus index）于20世纪90年代由Lemunyon提出，是用于评估农田径流磷损失潜力、指导磷管理决策的工具[7]，具有操作性高、普适性强等特点。磷指数模型评价体系包括因子组成、权重取值、磷指数计算3个环节，是将土壤磷含量、地形、气候和土地利用等农田特征系统性整合至农田磷损失潜力的预测。

通过场地评估确定磷污染关键区是美国现代养分管理规划的一个基本组成部分，现场评估工具是为了适应特定地理区域的各种现场条件而开发的。目前美国已有49个州对磷指数模型进行了应用和修正，其在各州的发展过程体现出较大的差异性和独特性。本文首先综述了磷指数模型在美国各州应用与发展的异同，凸显了模型在其应用过程中的优缺点，然后对其局限性进行了分析和讨论，进而从磷指数模型本土化应用的角度，提出未来在我国应用磷指数模型进行磷素管理的建议。

1 磷指数模型概述

磷指数建立在“源”和“汇”的因素框架上，这两个因素相结合可以量化农田对径流中磷素流失的相对脆弱性。21世纪初美国环保局和美国农业部对农场营养元素径流流失问题的重视，使得磷指数成为美国农田管理中最常见的营养管理方法。磷指数建立的最初目的是：①评估磷素从农田迁移到水体的风险；②确定影响磷流失的关键参数；③帮助确定管理实践，以减少磷流失。尽管磷指数在美国得到了广泛的应用，但磷素仍然是造成美国大部分地表水体受损的主要原因之一。磷指数评级的标准是否准确可靠、权重因子选取的依据是否充分、各州之间评级是否一致等问题使磷指数评价结果的可靠性受到影响。

磷指数应用之前，一般通过量化土壤测试磷和地表径流中磷浓度的关系对磷流失进行不完整评估[8]。研究发现，在不施用磷肥的情况下，磷的地表径流损失与土壤全磷含量有关；在施用磷肥的情况下，地表径流磷浓度与施肥呈显著正相关关系[9-10]。DeLaune等[11]发现，在阿肯色州牧场施用家禽粪便对径流中磷损失的影响超过了土壤全磷含量的影响。Pierson等[12]观察到，对于家禽养殖业来说，家禽粪便等对径流中磷浓度的残留影响可能会持续一年以上，每年施用粪肥使径流磷损失不断增加。除土壤测试磷之外的其他变量也会导致磷流失[9-10]。Pote等[8]的研究表明，土壤侵蚀敏感性造成了地点空间磷损失量的差异。因此，仅使用土壤测试磷不能全面反映磷素的潜在流失风险。

1993年，Lemunyon等[7]首次提出了磷指数模型，该方法选取了土壤养分磷背景值、化学磷肥和有机磷肥的施用量、施用时间、土壤侵蚀、地表径流等8个因子构建评价指标体系，根据每个因子测定值又划分为5个等级（无、低、中、高、极高），每个等级对应一个等级值（0、1、2、4、8），通过赋予每个因子相应的权重值，加合计算得到磷指数，最后将计算的磷指数从小到大分为4类风险等级（低、中、高、很高），从而获得研究区域磷流失的潜在风险空间分布状况，识别出磷流失高风险区。磷的流失受到多种因子的影响。2000年，Pionke等[5]根据各因子对磷流失的作用不同将其分为源因子和迁移因子，源因子包括土壤养分磷背景值、化肥和有机肥的施用量、施用方式和施用时间等，迁移因子包括土壤侵蚀、地表径流、农田距河流的距离等。

2 美国各州磷指数模型组成因子的差异

磷指数模型是一种用于评估农田磷排放风险的工具，能够识别出磷流失高风险区，在美国的一些州[7,13-28]及欧洲[29-38]等发达地区得到了广泛应用。该模型考虑了土壤类型、坡度和土地管理措施等多个因素，以确定磷对地表水体的排放风险。自磷指数提出以来，其在应用过程中一直不断地被改进和完善。磷指数的应用是建立在各州地理特征基础上的，各分区、州的情况各有不同。例如美国南部地区为确保各站点评估结果的一致性，用农田水的水质数据和模拟数据评估磷指数[21]；美国东北部地区以纽约州磷指数为基础进行修正和应用，引入最佳管理政策作为源因子[19-20]；美国中西部地区大多将磷指数模型作为一种监管工具，以确保能及时调整政策，减少富营养化出现的机率[32]；美国西部干旱地区为灌溉农业，因此将灌溉水利用系数引入源因子[33]。各地区、州根据当地实际影响磷流失的因素，调整和改进磷指数模型，使其能更准确地评估当地的磷素流失风险。美国各州

土壤、气候条件、农业环境和使用条件的不同，以及各州法律法规和政策的差异，导致各州磷指数模型的差异性突出。磷指数模型的差异性主要表现在源因子和迁移因子的选定上。源因子指磷素流失的发生源及其影响因子，迁移因子主要指影响从土壤流失的养分向河道及受纳水体迁移过程的各个因子。各州分级标准的差异使得跨州之间难以有标准化的磷指数模型框架。为规避先前州与州之间在分级标准、因子选取、计算方式等方面的差异导致的模型评价结果的不确定性，美国各区域、州逐渐形成以某一个州的磷指数模型为基础，再根据各州的基本情况进行优化磷指数模型。如中西部地区以爱荷华州磷指数模型为基础；东北部地区以纽约州磷指数模型为基础等。本文以美国4个地理分区为基础，分别对四大区域在应用磷指数模型过程中的差异性进行综述。

2.1 美国南部地区

美国南部地区建立的磷指数模型评价体系一般将Mehlich-3P[32-33]作为土壤磷素水平的衡量指标，但在应用过程中，土壤磷素水平的使用条件也各有不同。例如肯塔基州的磷指数模型使用前提是目标区域土壤有效磷值必须达到200 mg·kg^{-1}(400 lb·ac^{-1})[39-40]。肯塔基州磷指数模型未区分源因子和迁移因子，而是直接对选定的10个特征因子进行评估，并对每个特征因子进行加权。阿拉巴马州磷指数模型在其环境特点基础上增加了牧场动物量、地下排污口和受纳水体的水质作为磷指数模型因子[41-42]。阿肯色州磷指数模型引入了洪水泛滥频率和最佳管理措施(BMP)，并将施肥时间和施肥方式纳入迁移因子[43]。佛罗里达州和路易斯安纳州的磷指数模型引入了人工排水措施[44-46]。北卡罗来纳州[46]和乔治亚州[47]的磷指数模型考虑了3种流失途径：①颗粒态磷和固体废物；②可溶性磷；③地下排水。俄克拉荷马州[48]磷指数模型的源因子包括土壤测试磷、施用方法、侵蚀、坡度、洪水泛滥的频率、土壤的深度等，迁移因子包括磷风险评级、允许施用的P_2O_5数量、施肥方法和用以减小磷流失的最佳管理措施。南卡罗来纳州[49]的磷指数模型引入了地下排水因子，除了源因子与迁移因子外，其将缓冲区特征作为单独的评价标准。德克萨斯州的东部和西部根据其不同的地形特点对磷流失的风险评级有不同的标准[50]。

2.2 美国东北部地区

东北部地区的磷指数(NE-PI)是一种田间管理工具，旨在评估纽约州、康涅狄格州、马萨诸塞州、缅因州、罗德岛州和新罕布什尔州农田磷流失的相对风险[51]。东北部地区磷指数模型以纽约州磷指数(NY-PI 2.0)为基础，根据各州的实际场地特征进行调整应用。东北部地区磷指数是用迁移因子乘以最佳管理实践方法，其中根据驱动农田粪便和肥料磷运输的因素对农田进行评分，并且可以通过实施降低磷运输风险的最佳管理政策来降低评分。东北部地区不估计实际的磷损失，而是对颗粒态磷和溶解态磷径流的相对风险进行评级，旨在降低磷流失风险。东北部地区磷指数根据从农场记录、土壤侵蚀控制计划、粪肥和施肥计划以及实地考察中获得的信息，得出每个周期养分管理计划的相对风险评分。纽约州[19-20]的磷指数模型将源因子换成了最佳管理措施，同时它也包含了可能造成大量磷富集的因素，如施肥方式等。

2.3 美国中西部地区

内布拉斯加州[52]的磷指数模型是以爱荷华州[16]的磷指数模型为基础，再结合本州的环境条件加以改进。内布拉斯加州的动物废弃物和牧草会产生大量的磷源，极易造成周围水体的富营养化。为降低磷流失导致水体富营养化的风险，每隔5年就需要在有大量饲养动物的农场或牧地使用磷指数模型进行磷流失的风险评估。内布拉斯加州磷指数模型倾向于评估磷的流失风险，因此它的3个主要部分为：侵蚀组分、径流组分和灌溉组分。前两个部分的考虑因素与爱荷华州类似，灌溉组分主要考虑喷灌和畦灌所造成的磷损失。堪萨斯州[53]因为未考虑土壤背景磷值，其磷指数的评估结果与实际情况不符，在堪萨斯州将土壤背景值、喷灌和畦灌造成的磷流失纳入模型后，计算结果符合实际情况。密苏里州[54-55]的磷指数模型包含颗粒态磷和溶解态磷两个部分，颗粒态磷部分计算考虑的因素有颗粒态有机磷、土壤侵蚀、泥沙输移比，溶解态磷部分计算考虑的因素有可溶性活性磷、径流量、径流曲线数。这种计算方式与马里兰州和爱荷华州的计算方式类似，土壤侵蚀和土壤径流分别会造成颗粒态磷和溶解态磷的流失。俄亥俄州和威斯康星州临近苏必利尔湖和密歇根湖。俄亥俄州[56-57]的磷指数模型主要是为了分辨出特定站点的磷流失风险的高低；威斯康星州[17,58]的磷指数模型是用来评估特定站点的边缘磷流失风险，它对地表径流中的磷流失风险评估有限，也不适用于评估浅地表排水和人工排水造成的磷流失风险。这两个州的磷指数模型在农田和牧场条件下都可以使用。俄亥俄州的磷指数模型共有9个因子，各因子分开考虑，根据其对磷

迁移的贡献程度设定其权重值，最后将这9个因子得到的值相加。威斯康星州的磷指数模型与密苏里州的磷指数模型类似，都将其分为了颗粒态磷和溶解态磷，但威斯康星州的磷指数模型增加了田边与水体表面的输送情况。北达科塔州[59]、科罗拉多州[60]、蒙大拿州[61]这3个州在使用磷指数模型前，先使用筛选工具找出有高磷流失风险的站点后，然后再使用磷指数模型对该站点进行评估。明尼苏达州[26]天气极端，冬季寒冷，降雪较多，其磷指数模型考虑的是造成磷流失的每一条单独的途径，共有3条途径：①降雨径流中的沉积磷；②降雨径流中的可溶性磷；③融雪径流中的总磷。其中，融雪中的磷流失是主要途径。

2.4 美国西部地区

加利福尼亚州[62]先使用筛选工具对目标水域进行评估，排除不受磷影响的地表水和对水质无影响的流域。俄勒冈州[63]的西部和东部地区的种植类型、耕作方式，甚至是气候条件和土壤背景磷值都有很大的不同，因此磷指数模型也不同，具体表现在其取值的不同上。华盛顿州[64]的磷指数模型与俄勒冈州相似。

3 磷指数模型计算方法的差异

20世纪90年代，Lemunyon等[7]首次提出了磷评估工具的概念，即磷指数（Phosphorus Index，*PI*）法，用于评价农田到受纳水体的磷流失风险。该方法包括土壤侵蚀、灌溉侵蚀、径流、土壤有效磷、磷肥和有机肥的施用率及施用方法等，对各特征进行权重赋值，并为每个特征的每个级别分配等级值，使用公式（1）计算磷指数：

$$PI = \sum_{i=1}^{n}(F_i \times W_i) \quad (1)$$

式中：F_i表示第i个因子的等级值；W_i表示第i个因子的权重值。

该方法的输入数据易于获取，相对而言计算也更为简单。但该方法对这些影响因子仅进行了单一的计算，只考虑了每个因子对磷流失的单独影响，未充分考虑到各个因子之间的相互影响。除了权重赋值不同，所有因子都是等效的，因此在实际应用中会造成较大偏差。美国许多州仍在使用将各因子相加的计算方法，例如阿拉巴马州[41-42]、科罗拉多州[60]、俄亥俄州[56]、华盛顿州[64]、俄克拉荷马州[41]、肯塔基州[39-40]、德克萨斯州[43]等。

2000年，Gburek等[13]对磷指数模型进行了修正，其结合水文重现期来估计受纳水体附近的贡献距离，基于影响因子的不同特点将其划分为源因子和迁移因子，并对此前模型中的各个影响因子进行评估和改进，提出了以源因子和迁移因子的乘法运算[公式（2）]代替之前的加法运算。乘法关系更能真实地反映磷流失的区域，即关键源区是高磷源因子和高磷迁移因子相重叠的区域，评价源因子和迁移因子在田间尺度上的相互作用，更能准确地描述在流域尺度上田间与河流的连通性，从而进一步提高了模型的准确性。

$$PI = \sum_{i=1}^{n}(S_i \times X_i) \times \sum_{j=1}^{n}(T_j \times Y_j) \quad (2)$$

式中：S_i表示第i个源因子；X_i表示第i个源因子的权重值；T_j表示第j个迁移因子的等级值；Y_j表示第j个迁移因子的权重值。

相加-相乘法是目前使用最广泛的磷指数计算方法之一，该方法在美国的宾夕法尼亚州和佛罗里达州以及丹麦的很多地区都被广泛应用。距离因子的引入，使得磷指数模型更多地被应用于流域尺度的磷流失风险评估。例如，Hughes等[14]在田块和流域两种尺度下利用磷指数模型评估爱尔兰地区的磷流失风险，并根据磷流失风险情况提出了磷流失分级方案。

考虑到不同源因子的迁移途径不同，通过不同迁移途径流失的磷在形态上和数量上也不相同[15]，因而分别计算每个迁移方式的磷流失，然后相加得到的磷指数值更加符合实际。美国爱荷华州、威斯康星州、维吉尼亚州[16-18]等采用相乘-相加法来计算磷流失情况：首先根据迁移途径的不同将迁移方式划分为土壤侵蚀、地表径流、地下排水3个部分；然后根据相乘法计算每部分的磷指数值；最后相加汇总得到最终的磷指数值，如公式（3）所示：

$$PI = T_{\text{Rosion}} \times \sum_{i=1}^{l}(S_i \times W_i) + T_{\text{Runoff}} \times \sum_{j=1}^{m}(S_j \times W_j) + T_{\text{Subsurface}} \times \sum_{k=1}^{n}(S_k \times W_k) \quad (3)$$

式中：T_{Rosion}表示侵蚀迁移途径的等级值；S_i表示第i个源因子的等级值；W_i表示第i个源因子的权重值；T_{Runoff}表示径流迁移途径的等级值；S_j表示第j个源因子的等级值；W_j表示第j个源因子的权重值；$T_{\text{Subsurface}}$表示地下水迁移途径的等级值；S_k表示第k个源因子的等级值；W_k表示第k个源因子的权重值。

乔治亚州磷指数模型将来源、迁移和管理措施三者综合考虑，采用的是相乘-相加法，其将磷指数模型的计算方式改进后，得到一个可以对农田磷负荷进行定性的磷指数模型[47]。马里兰州、爱荷华州、内布

拉斯加州和宾夕法尼亚州等州采用的是相加-相乘法。马里兰州的磷指数虽然采用相加-相乘法得到,但其模型仍然是对每一条途径可能造成的磷流失分开估计,例如浅地表排水这一项,影响其值大小的因素有两个,一是季节性高水位时的深度,二是土壤排水的类型,这两个因素都要考虑,最后计算得到浅地表排水的评估值。爱荷华州在应用磷指数模型时采用相加-相乘法,其更加注重磷运移至地表水的情况,而不仅是磷流失风险[52]。内布拉斯加州同样采用相加-相乘法,但其更倾向于评估磷的流失风险[50]。俄亥俄州的磷指数模型一共有9个因子,各因子分开考虑,根据其对磷迁移的贡献程度设定其权重值,最后将这9个因子得到的值相加。随着各州对磷指数计算方法的逐渐发展完善(图1),其准确性和适用性得到了提升。

4 磷指数模型分级标准的差异

各州评估特定站点的磷流失风险是根据磷指数模型计算得到的结果判断该点所对应的评级。除了阿拉巴马州、俄克拉荷马州、德克萨斯州和威斯康星州以外,其余的州都采用"低、中、高、非常高"来对最后的结果进行评级。德克萨斯州增加了"极低",将"非常高"改为"极高"[36],威斯康星州使用磷指数模型计算得出一个具体的值,用于表示年均磷流失量[12]。美国南部地区气候多样,包含温带、亚热带、热带和干旱带,分布着混合农业区、棉花带和亚热带作物带,因此其分级标准取值也有所不同。由于各州的计算方法、使用条件、使用环境不同,其因子的取值标准也不同,对使用磷指数模型评估磷流失风险的结果也有所不同,其评级结果缺乏统一标准。例如佛罗里达州磷指数计算结果"<75"对应"低"[39],而乔治亚州磷指数的计算结果在"0~40"对应"低"这一标准[42],路易斯安那州磷指数计算结果在"<600"就达到了低磷流失风险[41]。但在美国东部地区[63],各州的分级取值范围差异较小,特拉华州、马里兰州、纽约州分级取值范围分别是:<50为低、50~74为中、75~99为高、≥100为非常高;宾夕法尼亚州分级取值范围是:≤59为低、60~79为中、80~99为高、≥100为非常高;弗吉尼亚州分级取值范围是:≤30为低、31~60为中、61~100为高、>100为非常高;西弗吉尼亚州分级取值范围是:≤35为低、36~70为中、71~100为高、>100为非常高。

在美国49个州应用的磷指数中,有17个州的磷指数通过与其他磷指数的磷损失评级进行比较来评估。对同一农田的磷指数评估进行比较,发现磷指数评级之间存在较大差异,并确定磷损失因素的变化对磷指数评级的影响不一致。虽然各指数之间的磷损失等级有助于识别磷指数之间的差异,但并不能表明磷指数是否是准确的风险评估工具。在美国49个州的应用中,磷损失评价包括径流模拟研究的测量数据,农田尺度磷损失研究的测量数据,以及流域或农田尺度模型的模拟数据。利用野外尺度的自然径流评价磷指数是最常见的方法(表1),由于所评价的磷指数的目的和方法的不同,评价结果各不相同。

5 局限性

磷指数模型考虑到了可能影响磷流失的广泛因素,这使得其对磷管理需求的评估更加准确,能有效

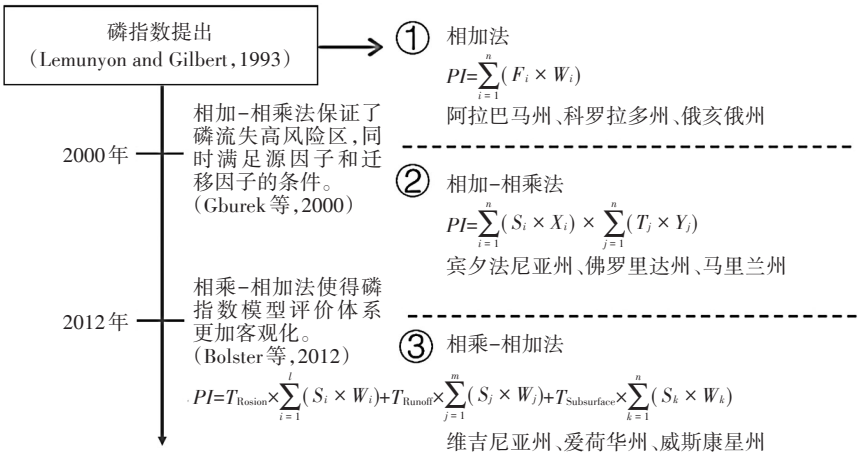

图1 磷指数计算方法发展过程

Figure 1 Development process of the phosphorus index calculation method

表1 美国部分州磷指数评估方法总结

Table 1 Summary of phosphorus index that have been evaluated in the United States

序号ID	方法Method	具体方法Description	地区Area
1	与其他磷指数比较	比较多个磷指数如何对特定田块进行评级，以及磷指数评级如何随农田管理变化而变化	阿拉巴马州、阿肯色州、佛罗里达州、乔治亚州、爱荷华州、堪萨斯州、肯塔基州、路易斯安那州、密西西比州、密苏里州、内布拉斯加州、新墨西哥州、北卡罗来纳州、田纳西州、德克萨斯州
2	敏感性分析	通过改变磷指数的单个输入值，将磷指数评级的相对变化与输入值的相对变化进行比较	宾夕法尼亚州、维吉尼亚州
3	小区域模拟降雨径流	在一系列农田管理和土壤条件下，将磷指数评级与小型模拟径流研究中测得的磷损失数据进行比较	堪萨斯州、宾夕法尼亚州
4	模型模拟数据	在一系列管理和土壤条件下，将磷指数评级与独立验证的计算机模型模拟的磷损失进行比较	宾夕法尼亚州
5	农田尺度实测数据	将磷指数评级与在各种管理或土壤条件下自然降雨环境中测量的年磷流失量进行比较	阿拉巴马州、阿肯色州、佛罗里达州、乔治亚州、爱荷华州、堪萨斯州、路易斯安那州、密西西比州、北卡罗来纳州、田纳西州、威斯康星州
6	流域尺度实测数据	将区域磷指数与流域出口处测量到的磷浓度或磷损失量进行比较	宾夕法尼亚州
7	其他评估方法	上述未涵盖的评估方法，如比较磷指数值和溪流沉积物中的磷浓度，评估磷指数对磷肥施用率的潜在影响等	纽约州、北卡罗来纳州、华盛顿州

地确定磷管理措施的目标，减少过度施用磷肥，最大限度地减少磷对环境的损失。在发达国家，磷指数被农民和研究人员广泛接受和使用，成为磷素管理的有效工具。而在发展中国家，农民大多依赖传统的磷素管理办法。当磷损失风险较低时，磷指数会导致过量施用磷肥，这会导致磷在田间持续积累从而失衡；当磷损失风险较高时，磷肥的施用量要和作物磷的吸收量达到平衡，从而实现农田磷养分平衡。所以在运用磷指数评估磷流失风险时，需要以磷损失量为基础。在应用过程中，磷指数还存在一些局限性。例如：磷指数是基于土壤测试值进行计算，不能准确反映农田的实际磷损失；磷指数没有考虑到其他可能影响磷流失的因素，如动物排泄、作物吸收等；由于各区域的营养物质、土地管理、景观属性、气候和主要的水文过程差异较大，全球范围内磷指数模型的使用具有较大差异性，导致其评估准确性受到影响；在估算磷指数的过程中，数据获取、参数优化是一个劳动密集型的复杂过程；磷指数在其应用过程中分级标准的差异性，影响因子选取是否有充分依据等原因使其评价结果缺乏对比性。尽管如此，磷指数在促进环境可持续的粮食生产方面的重要性是不容否认的。磷指数模型还需要进一步的研究来提高其准确性，以便更好地服务于全球范围内面源磷素污染的管理。

6 对我国的借鉴意义

我国是农业大国，为提高农业生产效益，截至2016年，我国磷肥施用量呈增加态势，磷肥过量施用造成土壤磷素累积的现象非常普遍。土壤磷库的空间分异特征使得针对性的磷素管理尤为重要。然而，在磷肥施用过程中，“哪里减、减多少、怎么减”缺乏一个清晰系统的认识。如何识别非点源污染的关键源区，将磷肥有针对性地施用于最需要的田地，将有助于提升环境治理的成本效益[65-68]。

我国应用磷指数模型起步较晚，2003年张淑荣等[68]首次在于桥水库流域应用了磷指数，其选取土壤侵蚀、地表径流、潜在污染源距水体的距离、土壤磷含量、化肥磷施用量和施用方法6个因子，识别出小流域磷流失高风险区。自此，研究人员分别在潮河流域[69]、妫水河流域耕作区[70]、巢湖流域[71-72]、凤羽河流域[73]、海河流域[74]、南方丘陵小流域[75]等地建立磷指数模型。在实际应用过程中，磷指数计算结果与实际情况相符，在我国使用具有合理性。例如我国在不断完善磷指数模型的过程中，综合考虑了磷流失风险的主要影响因素，充分考虑了社会经济条件和土地利用等变化的影响，更加直观地识别出磷流失的关键因子，揭示出磷的主要来源和关键区。但大多数研究以流域为尺度，且在因子选择、分级标准等方面缺乏统一的标准，具有主观性，因此还需要进一步探索和细化。

我国在未来应用磷指数模型时，可以从以下几个方面进行优化：①以当地的实际生态环境状况为基础，确定区域内共同的磷指数框架，从而增强其应用的标准化和推广性，以便研究机构、政府部门识别关键污染区域并实施战略性的最佳管理实践；②在我国农业系统中沟渠灌排系统在磷素迁移中起到了重要的作用，在小区域磷指数模型的应用过程中，需要量化沟渠对于磷素拦截的作用，将其纳入磷指数模型计

算因子中;③将磷指数框架建立在生态区的基础上,考虑将水体对磷输入的敏感性以及特定地点生物反应的变量纳入指数框架;④运用模型模拟对比验证磷指数评价结果的准确性,更精准地预测出磷素高风险地区,有效进行磷素管理;⑤在实际应用过程中,要与当地政府、农技部门和农民紧密联系,发挥磷指数模型易操作的特点,使之成为磷素管理的有效工具。

综上所述,磷指数模型是一个评估磷管理需求和指导农业磷管理决策的有效工具,它考虑到了可能影响磷损失的多种因素,可以对磷管理需求进行更精准的评估,对指导我国农田磷素管理具有借鉴意义。

参考文献:

[1] THEODOROU M E, PLAXTON W C. Metabolic adaptations of plant respiration to nutritional phosphate deprivation[J]. *Plant Physiology*, 1993, 101(2):339-344.

[2] MACINTOSH K A, MAYER B K, MCDOWELL R W, et al. Managing diffuse phosphorus at the source versus at the sink[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(21):11995-12009.

[3] SCHINDLER D W, CARPENTER S R, CHAPRA S C, et al. Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(17):8923-8929.

[4] YU C Q, HUANG X, CHEN H, et al. Managing nitrogen to restore water quality in China[J]. *Nature*, 2019, 567(7749):516-520.

[5] 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[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 14(4):325-335.

[6] STRAUSS P, LEONE A, RIPA M N, et al. Using critical source areas for targeting cost effective best management practices to mitigate phosphorus and sediment transfer at the watershed scale[J]. *Soil Use and Management*, 2007, 23:144-153.

[7] LEMUNYON J L, GILBERT R G. The concept and need for a phosphorus assessment tool[J]. *Journal of Production Agriculture*, 1993, 6(4):483-486.

[8] POTE D H, DANIEL T C, SHARPLEY A N, et al. Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff[J]. *Soil Science Society of America*, 1996, 60(3):855-859.

[9] SHARPLEY A N, KLEINMAN P J A, MCDOWELL R W, et al. Modeling phosphorus transport in agricultural watersheds:processes and possibilities[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 57(6):425-439.

[10] SIMS J T. The phosphorus index:a phosphorus management strategy for Delaware's agricultural soils[DB/OL]. [2023-06-24]. https://www.udel.edu/academics/colleges/canr/cooperative-extension/fact-sheets/phosphorus-management-strategies-for-delawares-agricultural-soils-the-phosphorus-site-index/.

[11] DELAUNE P B, MOORE P A JR, CARMAN D K, et al. Development of a phosphorus index for pastures fertilized with poultry litter:factors affecting phosphorus runoff[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(6):2183-2191.

[12] PIERSON S T, CABRERA M L, EVANYLO G K, et al. Phosphorus and ammonium concentrations in surface runoff from grasslands fertilized with broiler litter[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(5):1784-1789.

[13] GBUREK W J, SHARPLEY A N, HEATHWAUTE L, et al. Phosphorus management at the watershed scale:a modification of the phosphorus index[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1):130-144.

[14] HUGHES K J, MAGETTE W L, KURZ I. Identifying critical source areas for phosphorus loss in Ireland using field and catchment scale ranking schemes[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 304(1/2/3/4):430-445.

[15] 李文超, 刘申, 刘宏斌, 等. 国内外磷指数评价指标体系研究进展[J]. 土壤通报, 2016, 47(2):489-498. LI W C, LIU S, LIU H B, et al. Review on phosphorus indices as risk- assessment tools at home and abroad[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(2):489-498.

[16] MALLARINO A P, STEWART B M, BAKER J L, et al. Phosphorus indexing for cropland:overview and basic concepts of the Iowa phosphorus index[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 57(6):440-447.

[17] GOOD L W, VADAS P, PANUSKA J C, et al. Testing the Wisconsin phosphorus index with year round, field scale runoff monitoring[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(6):1730-1740.

[18] JESIEK J, WOLFE M L. Phosphorus management:an analysis of the Virginia phosphorus index[DB/OL]. [2023-07-15]. https://www.udel.edu/Phosphorus Management:An Analysis of the Virginia Phosphorus Index(vt.edu).

[19] CELA S, KETTERINGS Q M, CZYMMEK K J, et al. Nutrient management planners' feedback on New York and Pennsylvania phosphorus indices[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 71(4):281-288.

[20] CZYMMEK K J, KETTERINGS Q M, GEOHRING L D, et al. The New York phosphorus runoff index[DB/OL]. [2023-06-24]. http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/files/NYPI_2_User_Manual.pdf.

[21] OSMOND D L, CABRERA M L, FEAGLEY S E, et al. Comparing ratings of the southern phosphorus indices[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 61(6):325-337.

[22] SHARPLEY A N, BEEGLE D, BOLSTER C, et al. Revision of the 590 nutrient management standard:SERA-17 recommendations[DB/OL]. [2023-06-24]. https://nutrientmanagement.tamu.edu/content/tools/sera17_590_review.pdf.

[23] SHARPLEY A, BEEGLE D, BOLSTER C, et al. Phosphorus indices:why we need to take stock of how we are doing[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(6):1711-1719.

[24] SHARPLEY A N, BOLSTER C, CONOVER C, et al. Technical guidance for assessing phosphorus indices[DB/OL]. [2023-06-24]. https://saaesd.org/wp-content/uploads/2017/12/Assessing-P-Indices-SERA17-3.pdf.

[25] SHARPLEY A N, WELD J L, BEEGLE D B, et al. Development of

phosphorus indices for nutrient management planning strategies in the United States[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 58(3):137-152.

[26] DABNEY S M, YODER D C, VIEIRA D A N. The application of the Revised Universal Soil Loss Equation, Version 2, to evaluate the impacts of alternative climate change scenarios on runoff and sediment yield[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 67(5):343-353.

[27] SANDERSON M A, JOLLEYL W, DOBROWOLSKI J P. Pastureland and hayland in the USA: land resources, conservation practices, and ecosystem services[DB/OL]. [2023-06-24]. https://www.afgc. org/wp-content/uploads/ch_1.pdf.

[28] WELD J, BEEGLE D, BRYANT R, et al. The Pennsylvania phosphorus index: Version 2[DB/OL]. [2023-06-24]. https://extension. psu. edu/the-pennsylvania-phosphorus-index-version-2.

[29] USITALO L, BLANCHET H, ANDERSEN J H, et al. Indicator-based assessment of marine biological diversity-lessons from 10 case studies across the European seas[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2016, 3:159.

[30] ANDERSEN H E, KRONVANG B. Modifying and evaluating a P index for Denmark[DB/OL]. [2023-06-24]. https://link. springer. com/article/10. 1007/s11270-006-9123-0.

[31] BECHMANN M, KROGSTAD T, SHARPLEY A. A phosphorus index for Norway[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica Section*, 2005, 55(3):205-213.

[32] MAGUIRE R O, SIMS J T. Measuring agronomic and environmental soil phosphorus saturation and predicting phosphorus leaching with Mehlich 3[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(6):2033-2039.

[33] WELD J L, SHARPLEY A N, BEEGLE D B, et al. Identifying critical sources of phosphorus export from agricultural watersheds[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 59:29-38.

[34] TIEMEYER B, KAHLE P, LENNARTZ B. Phosphorus losses from an artificially drained rural lowland catchment in North-Eastern Germany[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(4):677-690.

[35] KOCH S, KAHLE P, LENNARTZ B. Spatio-temporal analysis of phosphorus concentrations in a North-Eastern German lowland watershed[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2018, 15:203-216.

[36] HECKRATH G, BECHMANN M, EKHOLM P, et al. Review of indexing tools for identifying high risk areas of phosphorus loss in Nordic catchments[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(1/2):68-87.

[37] BECHMANN M E, STALNACKE. Testing the Norwegian phosphorus index at the field and subcatchment scale[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 120(2):117-128.

[38] ULEN B, BECHMANN M, FOLSTER J, et al. Agriculture as a phosphorus source for eutrophication in the north-west European countries, Norway, Sweden, United Kingdom and Ireland: a review[J]. *Soil Use and Management*, 2007, 23:5-15.

[39] BOLSTER C H, HORVATH T, LEE B D, et al. Development and testing of a new phosphorus index for Kentucky[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 69(3):183-196.

[40] BOLSTER C H. A critical evaluation of the Kentucky phosphorus index[J]. *Journal of the Kentucky Academy of Science*, 2011, 72(1):46-58.

[41] OSMOND D, BOLSTER C, SHARPLEY A, et al. Southern phosphorus indices, water quality data, and modeling (APEX, APLE, and TBET) results: a comparison[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2017, 46(6):1296-1305.

[42] SEN S, SRIVASTAVA P, DANE J H, et al. Spatial-temporal variability and hydrologic connectivity of runoff generation areas in a North Alabama pasture: implications for phosphorus transport[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(3):342-356.

[43] DELAUNE P B, MOORE P A, CARMAN D K, et al. Evaluation of the phosphorus source component in the phosphorus index for pastures[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(6):2192-2200.

[44] BOARD U S A. Review of EPA's draft approaches for deriving numeric nutrient criteria for Florida's estuaries, coastal waters, and southern inland flowing waters. USEPA Scientific Advisory Board[DB/OL]. [2023-06-24]. http://nepis. epa. gov/P100RNHC. PNG(638×825)(epa.gov).

[45] LOW H M. Assessment of the effects of conservation practices on cultivated cropland in the south Atlantic Gulf Basin[DB/OL]. [2023-06-24]. https://www. nrcs. usda. gov/.

[46] JOHNSON A M, OSMOND D L, HODGES S C. Predicted impact and evaluation of North Carolina's phosphorus indexing tool[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(5):1801-1810.

[47] BULTER D M, FRANKLIN D H, CABRERA M L, et al. Assessment of the Georgia phosphorus index on farm at the field scale for grassland management[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 65(3):200-210.

[48] OSMOND D, SHARPLEY A, BOLSTER C, et al. Comparing phosphorus indices from twelve southern US states against monitored phosphorus loads from six prior southern studies[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(6):1741-1749.

[49] SCHROER W F, BENITEZ-NELSON C R, SMITH E M, et al. Drivers of sediment accumulation and nutrient burial in coastal stormwater detention ponds, South Carolina, USA[J]. *Ecosystems*, 2018, 21:1118-1138.

[50] WHITE M W, HARMEL R D, HANEY R L. Development and validation of the Texas best management practice evaluation tool(TBET)[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 67(6):525-535.

[51] KETTERINGS Q M K, WORKMAN D. Northeast region phosphorus index. User's guide[DB/OL]. [2023-06-24]. http://nmsp. cals. cornell. edu/publications/extension/NortheastPIndexUserGuide. pdf.

[52] WORTMANN C, SHAPIRO C, JOHNSON L J, et al. The Nebraska phosphorus index (2012): Background and users guide[DB/OL]. [2023-06-24]. https://extensionpublications. unl. edu/assets/pdf/ec195. pdf.

[53] SHARPLEY A N, MOORE P A, VANDEVENDER K, et al. Arkansas phosphorus index. Fact sheet FSA 9531. Cooperative extension service, Division of Agriculture, Univ. of Arkansas[DB/OL]. [2023-06-24]. https://www. uaex. uada. edu/publications/PDF/FSA-9531.pdf.

[54] LORY J A. Managing manure phosphorus to protect water quality[DB/OL]. [2023-06-24]. https://hdl. handle. net/10355/69189.

[55] LORY J A, MILLER R, DAVIS G, et al. The Missouri phosphorus index[DB/OL]. [2023-06-24]. https://extension. missouri. edu/publications/g9184.

[56] DAYTON E A, HOLLOMAN C H, SUBBURAYALU S, et al. Using crop management scenario simulations to evaluate the sensitivity of the Ohio phosphorus risk index[J]. *Journal of Environmental Protection*, 2017, 8(2):141.

[57] BAKER D B, JOHNSON L T, CONFESOR R B, et al. Vertical stratification of soil phosphorus as a concern for dissolved phosphorus runoff in the Lake Erie basin[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2017, 46(6):1287-1295.

[58] REID K, SCHNEIDER K, MCCMONKRY B. Components of phosphorus loss from agricultural landscapes, and how to incorporate them into risk assessment tools[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2018, 6:135.

[59] FIORELLINO N M, MCGRATH J M, VADAS P A, et al. Using the Annual Phosphorus Loss Estimator(APLE) model to evaluate the University of Maryland phosphorus management Tool[C]//ASA-CSSA-SSSA Annual Meeting Abstracts, 2013.

[60] COMTE L, OLDEN J D, LISCHKA S, et al. Multi-scale threat assessment of riverine ecosystems in the Colorado River Basin[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 138:108840.

[61] IPPOLITO J A, BARARICK K A, NORVELL K L. Biosolids impact soil phosphorus accountability, fractionation, and potential environmental risk[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(3):764-772.

[62] ANDREWS S S, KARLEN D L, MITCHELL J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 90(1):25-45.

[63] SULLIVAN D M, STEVENS R G. Agricultural phosphorus management using the Oregon / Washington phosphorus indexes[DB / OL]. [2023-06-24]. https://catalog. extension. oregonstate. edu/cart.

[64] LEWANDOWSKI A, MONCRIEF J, DREWITZ M. The Minnesota phosphorus index: Assessing risk of phosphorus loss from cropland [DB/OL]. [2023-06-24]. https://hdl. handle. net/11299/48349.

[65] XUE J, WANG Q, ZHANG M. A review of non-point source water pollution modeling for the urban-rural transitional areas of China: research status and prospect[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 826:154146.

[66] QU Y, ZHANG Q, ZHAN L, et al. Understanding the nonpoint source pollution loads′ spatiotemporal dynamic response to intensive land use in rural China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 315:115066.

[67] UDDIN M G, NASH S, OLBERT A I. A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 122:107218.

[68] 张淑荣, 陈利顶, 傅伯杰, 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[J]. 第四纪研究, 2003, 23(3):262-269. ZHANG S R, CHEN L D, FU B J, et al. The risk assessment of nonpoint pollution of phosphorus from agricultural lands: a case study of Yuqiao Reservoir watershed[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(3):262-269.

[69] 欧洋. 基于GIS的流域非点源污染关键源区识别与控制[D]. 北京:首都师范大学, 2008. OU Y. Identification of critical source areas (CSAs) for non-point source pollution in Miyun watershed[D]. Beijing: Capital Normal University, 2008.

[70] 李琪, 陈利顶, 齐鑫, 等. 妫水河流域农耕区非点源磷污染危险性评价与关键源区识别[J]. 环境科学, 2008, 29(1):32-37. LI Q, CHEN L D, QI X, et al. Identification of critical area of phosphorus loss in agricultural areas of Guishui River watershed by phosphorus loss risk assessment[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(1):32-37.

[71] 高敏. 基于ArcGIS的流域磷指数模型构建及应用研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2022. GAO M. Research on the construction and application of ArcGIS-based watershed phosphorus index model[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022.

[72] 姜晓霞. 巢湖典型河流沉积物磷赋存形态及流域磷流失风险研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2021. JIANG X X. Phosphorus forms in river sediments and phosphorus loss risk from typical river watersheds of Chao Lake basin[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021.

[73] 李文超. 凤羽河流域农业面源污染负荷估算及关键区识别研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2014. LI W C. Evaluating the loads of agricultral non-point source pollution and identifying critical source areas in Fengyu basin[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.

[74] 吴汉卿, 万炜, 单艳军, 等. 基于磷指数模型的海河流域农田磷流失环境风险评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14):17-27. WU H Q, WAN W, SHAN Y J, et al. Environmental risk assessment of phosphorus loss from farmland based on phosphorus index model in the Haihe River basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(14):17-27.

[75] 苏静君, 赵洪涛, 焦茹媛, 等. 基于R语言的非点源颗粒态磷指数构建及应用:以丘陵红壤区小流域为例[J]. 中国环境科学, 2021, 41(4):1868-1877. SU J J, ZHAO H T, JIAO R Y, et al. Identifying the critical sources areas of non-point particulate phosphorus based on an index approach in R: a case study in red soil hilly micro-watershed[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(4):1868-1877.

(责任编辑:李丹)