

农业非点源磷流失潜在风险评价 ——磷指数法研究进展

李 娜, 郭怀成

(北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871)

摘 要:农业非点源污染主要输出污染物——磷已经成为决定水体富营养化的关键因子,但农业非点源污染具有空间分布的广泛性、不确定性等特点,对其控制和治理难度较大。目前通过识别农业非点源磷流失潜在高风险区,从而更加有的放矢的制定相应的管理措施已经成为提高农业非点源磷控制效率的有效途径。磷指数法(Phosphorus Index, PI)是考虑多因子协同作用,通过构建指标体系来评估磷流失潜在风险的有效方法,该方法简单、实用,并且注重与GIS的结合使评估结果具有更好的可视性和可操作性。本文对PI法的提出、因子选取、计算方法等关键技术环节的改进进行系统的评述,并总结该方法目前应用的范围和尺度,以促进该方法在中国的发展和应用。

关 键 词:磷指数;风险评估;农业非点源;高风险区识别

磷是大多数淡水藻类生长的主要限制因子,因此成为决定水体富营养化的关键物质^[1-2]。农田养分的投入和不断积累,使农业非点源污染的主要输出物质——磷成为水体中磷的主要来源^[3-4]。因此,对农业非点源磷的控制成为非点源污染控制研究的热点之一。但农业非点源污染具有空间分布的广泛性、不确定性等特点,因此,对其控制和治理难度较大,需要耗费大量的人力、物力和财力。磷指数法(Phosphorus Index, PI)是结合GIS的磷流失潜在风险评价的一种方法,通过PI评价可以找到磷流失潜在风险高的区域,从而使磷的管理和控制更加有的放矢,减少经济投入,提高非点源污染的控制效率,目前该方法在美国和欧洲一些国家得到广泛的应用。本文对国内外,特别是国外PI法的相关研究进展进行了系统地归纳和分析,内容包括评价因子的选取、计算方法的改进以及方法应用的范围、尺度等诸多方面。

1 PI法的提出及发展改进

1.1 PI法的提出

表层土壤(0 ~ 5 cm)中土壤测试磷(Soil Test

Phosphorus, STP)含量与地表径流中磷浓度存在显著的相关关系^[5-6],因此学者一般采用STP评估土壤磷流失风险。但STP仅是决定土壤磷对地表水潜在影响的因子之一,许多其他因子,如降水、土壤性质以及农业管理措施等都影响着土壤磷释放及其向地表水的输移。因此,单单使用STP并不能够全面反映磷潜在流失风险。

1993年Lemunyon和Gilbert^[7]考虑到多因子协同作用,首先提出了PI(PI-L&G)法。该法选取土壤侵蚀、地表径流、STP、化学磷肥和有机磷肥的施用量和施用方法等8个因子构建评价指标体系,根据每个因子测定值将其划分为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)并赋予每个因子相应的权重值,最后通过公式(1)加权计算(Additive Approach)得到PI指数。

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

式中: F_i 表示第 i 个因子等级值; W_i 表示第 i 个因子权重。

最后将计算的PI指数从小到大分为4类风险等级(低、中、高、很高),从而获得研究区域的磷流失潜在风险空间分布,界定出磷流失高风险区的位置

收稿日期:2009-06; 修订日期:2010-07.

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07102-001).

作者简介:李娜(1978-),女,博士生,主要研究方向为环境规划与管理、流域水污染控制. E-mail: lina2006@pku.edu.cn

通讯作者:郭怀成, hcguo@pku.edu.cn

和范围。

Lemunyon等建立的PI法是一种适用于农田尺度的评价磷流失潜在风险的简单工具,它帮助农业生产者和水土保持机构确定农田的磷排放到周围水体的危险程度。

1.2 PI法主要改进

Lemunyon和Gilbert建立起PI法之后,许多学者都肯定这一方法,并在此基础上根据评价对象的不同不断改进,推动了该方法的发展。归纳起来,PI法提出后其改进主要体现在以下3方面:

1.2.1 PI评价因子修正

评价因子选取是PI法的关键技术之一。Gbu-rek等^[8]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,磷的流失依赖于两类因子同时发生。目前约20多个因子在PI指标体系中得到体现(表1)。

(1) 源因子(Source Factors)

源因子主要反映各种土地利用方式下土壤中磷含量、磷肥输入、土壤对磷的吸持能力等,表明该区域是否具有较高的磷输出潜力。Lemunyon和Gilbert提出的PI指标体系中涉及到的源因子包括:STP、磷肥(有机和化学)的施用量和施用方法。之后,许多学者不断将能够表示和影响磷输出潜力的源因子引入指标体系,例如:Jolela等^[9]研究发现土壤中活性铝含量不同,土壤中施入磷肥(包括有机和化学)时磷的增加量也不同,活性铝对土壤磷的释放具有抑制作用,因此,Jolela等^[10]在源因子中引用了土壤中活性铝量,作为所施用的磷肥量(有机和化学)的修正系数。Elliott等^[11]提出磷源系数(Phosphorus Source Coefficients, PSCs)通过权重系数将有机磷肥施用量转化为可溶性磷含量,从而体现不同有机磷肥对径流中溶解磷的贡献率^[12];Leytem等^[13]将PSCs引入PI法指标体系中,并根据施肥肥方式对PSCs权重进行修正^[14],以便更好地反映可溶性磷的流失风险。经过研究发现土壤磷饱和度(Degree of Phosphorus Saturation, DPS)与径流中溶解磷的浓度呈现更好的相关性,而且DPS考虑不同土壤类型,因此能够比STP更好地反映磷的流失潜力^[15],因此,Sharply^[16]使用DSP替代STP作为土壤磷含量的表征。Uhlen^[17]的研究结果表明在施过肥的草地,当植物冻结后径流中的磷含量会有显著的增加。因此,Bechmann等^[18]增加了植物残留磷。此外,McFarland等^[19]、Coal等^[20]引入植被放牧

管理、受纳水体水质、磷去除率等因子。

(2) 迁移因子(Transport Factors)

迁移因子直接或间接影响磷的迁移。Lemunyon和Gilbert最初提出的PI指标体系中涉及的迁移因子是土壤侵蚀、地表径流。土壤侵蚀是磷流失的主要发生形式,且侵蚀泥沙中的磷会有较明显的富集现象。地表径流是造成土壤侵蚀的主要驱动力,除了增加土壤侵蚀,也造成径流中溶解态磷流失量的增加。许多学者通过全面考虑磷的流失途径,不断完善迁移因子,以便全面和真实反映磷的流失潜力。Klausner等^[21-22]用水文敏感因子(包括坡长/坡度、洪水频率等)来替代径流等级,以便更好地体现径流对磷流失的影响。由于磷在迁移过程中不断被稀释和截留^[23],距离河流较远的磷源区的贡献一般要比距离较近的源区小。因此,McFarland等^[19]将与受纳水体的距离纳入迁移因子,此外,Gburek等^[24]结合水文学中普遍使用的重现期与径流峰值之间的关系,建立了重现期与贡献距离之间的定量关系,并将其纳入迁移因子。研究表明,除地表径流和土壤侵蚀,在地下水位高、土壤磷饱和或砂质土壤地区,亚表径流也是磷进入地表水体的重要途径之一^[25]。因此,Sharpley等^[26]、Coale^[27]分别引入了淋溶因子、亚表排水因子。缓冲带通过截留、吸收、降解等作用减小了磷对水体的影响,其去除效果与其宽度成正比,因此,Jokla^[28]引入缓冲带

表1 影响磷流失的源因子和迁移因子

Tab.1 Source and transport factors affecting P loss

因子	重要性	应用
源因子		
STP	径流中的溶解磷与STP显著相关	基本都应用
有机磷肥施用量	增加土壤含磷水平;有机肥的氮磷比低于植物的需求	
有机磷肥施用方法	直接影响磷的流失(地表施肥>播散>压埋作肥>滴灌)	
有机磷肥施用时间	直接影响磷的流失(施肥后遇大降雨磷流失量剧增)	
化学磷肥(同有机磷肥)	与有机肥的影响相同	一些版本中应用
DSP	比STP更好地估算磷的流失潜力	
植物残留磷	植物残体会释放可溶性磷	较少被应用
磷去除率	修正磷肥的施用率	应用
土壤侵蚀	颗粒态磷流失的主要形式	基本都应用
地表径流	发生侵蚀的主要驱动力;输移溶解态的磷	
灌溉径流	不适当的灌溉能够引起地表径流和侵蚀	
迁移因子		
贡献距离	距离河流较近的源区对磷贡献率高	
缓冲带宽度	能够减小磷对水体的影响	
亚表排水	砂质或有机质含量高的土壤中磷主要流失形式,尤其有瓦管排水的农田	一些版本中应用
风力侵蚀	与土壤侵蚀相同,但是路径很难确定	较少被应用
融雪径流	积雪融水也形成径流	
受纳水体敏感度	不同的功能的水体对磷输入响应不同	

宽度因子。此外,Bir 等^[29]、Lewandowski 等^[30]、Weld 等^[31]引入河道两边 91.4 m 内农田与草地的面积比、冰雪融化径流、连通性等因子。

1.2.2 PI 评价因子的分级和权重确定

PI 法一般将各因子依据其测量值划分为几个等级(如很低、低、中、高、很高),赋予每一级相应的等级值(如 0、1、2、4、8),高等级值代表磷高流失风险。一般会根据研究区域的特点对各因子的分级标准进行校正。但是这样的等级赋值带有一定的主观性,一些改进的 PI 法用一些因子的实测值或模型估算值来代替其等级值,如应用实测 STP 值和磷施用量替代其等级值;采用 RULSE、WEEP^[32-33]计算实际的土壤侵蚀量,应用 CN 方法计算降雨产流。

因子的权重体现了其对磷流失的影响的大小,各个版本因子的权重会根据研究区域的特点进行矫正,因此不同版本的 PI 因子权重值相差比较大。一般因子的权重赋值采用专家打分法,是一种定性和粗略定量的因子权重赋值的方法,且存在一定的主观性, Delaune 等^[34]根据实验观测数据采用多元回归确定源因子和迁移因子的权重,使得因子权重赋值更加客观。

1.2.3 PI 指数计算方法

Lemunyon 和 Gilbert 提出的 PI 法中,PI 指数通过因子加合计算(图 1 公式①)求得。目前仍有一些 PI 法采用加合方法计算,例如美国阿拉巴马州、俄亥俄州以及加拿大魁北克省^[35-37]。加合计算是将各因子对磷流失的影响看作是相同的,未考虑因子之间的交互作用。

如果一个地区的土壤磷含量很高,但是没有产生地表径流或发生土壤侵蚀,采用加合计算时,地区的磷流失风险指数仍然会很高,这就与实际情况不相符合。因此,Gurbert 等^[8]将源因子和迁移因子之间的加法关系改为乘法关系(图 1 公式②),把迁

移因子看作对源因子的度量,保证了高风险区必须同时具备源因子和迁移因子两个条件。目前这是应用最为广泛的 PI 值计算方法,例如美国宾夕法尼亚州^[38]、佛罗里达州^[39]、丹麦^[38-40]等都是采用乘法计算 PI 指数。

一般,PI 指数并不是磷的实际流失量,而是一个表示磷潜在流失风险高低的一个相对值。但美国爱荷华州、威斯康星州、维吉尼亚州^[41-43]等试图采用相乘加合计算(图 1 公式③)磷的实际流失量,即按照土壤侵蚀、地表径流、亚表排水 3 种迁移方式计算磷流失的量,每种迁移方式采取乘法计算,最后将 3 种迁移方式进行加合。

1.3 PI 法其他方面的改进

美国经济学家 Johansson 等^[44]提出 EPI(Economic Phosphorus Index),农民可根据自己的判断,权衡磷排放控制效益和费用之间的关系,从而用有限的资金采取最经济有效的土壤保持和其他管理措施;另一方面,EPI 可以帮助规划决策部门评价综合土地单元潜在磷排放,从而制定详细的、经济有效的磷控制措施。与 PI 法比较,使用 EPI 的磷流失目标控制节约了磷流失控制费用的 50%。

PI 分析计算需要收集和测量大量的数据,是一个比较复杂过程,因此一些地区在应用 PI 法进行详细分析之前,通过简单因子优选出需要进一步风险分析的区域,以提高 PI 法的效率。例如,美国宾夕法尼亚州^[31]开发了可视化工具(Screening Tool),设定如果农田与水体距离小于 45.7 m 或 STP 超过 200 ppm,则该农田磷流失的风险比较高,需要进一步的风险评估。美国明尼苏达州^[30]建立了 RPI 法(Rapid P Index),通过 4 个简单因子(磷肥施用量和施用率、STP、与水体距离)快速识别需进一步进行流失风险评估的农田。丹麦规定,STP 若是超过 20 mg/kg,以及距离水体小于 45 m 或者大于 45 m 有排

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

②
$$PI = \left(\sum_{i=1}^m SF_i W_{si} \right) \times \left(\sum_{j=1}^n TF_j W_{tj} \right)$$

③
$$PI = F_{soil\ erosion} \left(\prod \text{土壤流失,颗粒态磷} \right) + F_{runoff} \left(\prod \text{径流,溶解态磷} \right) + F_{sunsurface} \left(\prod \text{淋溶,过滤} \right)$$

PI (Lemunyon & Gilbert)

↓

↓

式中: F_i 因子等级值; W_i 因子权重; SF_i 源因子; TF_j 迁移因子; $F_{soil\ erosion}$ 土壤侵蚀因子; F_{runoff} 地表径流; $F_{sunsurface}$ 亚表径流

图 1 PI 值计算方法
Fig.1 Overview of PI values calculation

水系统的农田, 需要进一步进行风险分析。

美国纽约州建立的 PI 法^[45-46]考虑不同形态磷流失的情况, 将迁移因子分为溶解态和颗粒态, 分别与源因子计算两种形态磷的 PI 值(Dissolved P Index/Particulate P Index), 以评价土地管理对不同形态磷流失的影响。颗粒态磷主要是随着土壤侵蚀发生迁移, 所以主要突出土壤侵蚀的作用, 而溶解态磷强调土壤排水在迁移过程中的作用。

此外, 美国一些州将最佳管理措施列为单独因子, 即将该地区使用的并且对防止磷流失有一定效果的措施引入到 PI 指标体系中, 使计算结果能更好地反映磷流失潜力。例如, 美国佛蒙特州将磷肥的施用方式、施用时间作为磷的管理措施因子与土壤磷背景值相乘, 还将缓冲带系数(0.7 ~ 1.0)与磷的迁移潜力相乘来反映被缓冲带截流磷的数量^[10]。

2 PI法应用范围和尺度

2.1 PI法应用范围

目前美国已经有 47 个州^[47]对 Lemunyon 和 Gilbert 最初提出的 PI 法进行修正, 使其在该州具有更好的适用性。在丹麦、爱尔兰、英国、瑞典等欧洲国家 PI 法也得到广泛发展和改进(表 2)。Magette^[48]改进 PI(L&G)建立适用于爱尔兰地区的磷分级系统 (Phosphorus Ranking Scheme, PRS), PRS 含有 9 个因子, 同时适用于农田和流域尺度, 但 PRS 对数据的要求很高, 缺乏实用性。Hughes^[49]将其拆分为地块磷分级系统 PRS(Field PRS)和流域磷分级系统 PRS(Catchment PRS, CPRS), 两种尺度下采用不同的指标体系, 使其更有效的应用于不同尺度。Heathwaite^[50]建立了适用于英国的 Phosphorus Indicator Tool(PIT), PIT 是由磷的流失、输移和转化 3 个层次构成, 在考虑了土地利用对磷输出的影响的同时还考虑了地形、降雨等因素。此外, Heathwait 等^[51]还提出适用于欧洲的 PI 指标体系, 该体系主要考虑与寒冷气候相关的因子以及土壤有机质含量等。加拿大^[52]、瑞典^[53]、挪威^[54]等对美国各州建立的 PI 法进行修正建立了适合于自己国家的 PI 法。

2.2 PI应用尺度

PI 法目前主要还是应用于农田尺度。例如, 挪威将 PI 法应用到东南部的农业区^[55]; 美国 PI 法

表 2 PI 法在各国的发展

Tab.2 The development of phosphorus index in different countries

国家	年份	学者	指标体系
美国	1993	Lemunyon, Gilbert	PI(L& G)
	2000	Sharpley	Pennsylvania PI
加拿大	1998	Bolinder	Modified PI(L& G)
爱尔兰	1998	Magette, Hughes	PRS(Phosphorus Ranking Scheme)
芬兰	2001	Tuhkanen	Phosphorus indicator Tool (PIT)
英国	2003	Heathwaite	
瑞典	2005	Djordjic, Bergström	Modified Maryland PI
挪威	2005	Bechmann	Modified Pennsylvania PI
丹麦	2006	Andersen, Kronvang	Modified Pennsylvania PI

主要是针对旱作土壤的农田, 农田比例大多在 1: 5000。此外, DeLaune 等^[56]将 PI 法运用到美国 Eucha-Spavinaw 流域的 6 个牧场, 通过与 STP 比较, PI 法是比较好的评价磷流失潜力的工具, 从而扩大了其应用范围。

随着距离因子的纳入, 使得 PI 法在流域尺度上评估磷流失风险具有较强的可操作性。因此一些学者尝试在小流域尺度应用 PI 法识别磷流失高风险区, 如 Sharply^[57]将 PI(L&G)应用到美国南部小流域(流域面积 1.1 ~ 125 ha), 研究表明 PI 法能在大约 2 ha 的小流域内准确地进行磷流失高风险区的识别; Veith 等^[58]将 PI 法应用到美国宾夕法尼亚州 Mahantango Creek 流域(流域面积 39.5 ha), 通过与 SWAT 模型的比较, 证明 PI 法也能很好的识别磷流失潜在高风险区; Magtte^[59]将 PRS 应用到爱尔兰 Bellsgrrove 6 个子流域(流域面积 108 ~ 288 ha); Hughes 等^[60]将改进的 PI 法应用到爱尔兰的 30 个小流域(流域面积 1 ~ 29 km²), 结果均表明识别出的高风险区域与河流的磷浓度具有较好的相关性。

Gburke 等指出大尺度流域内磷源区是变化的, 且磷的迁移机制和路径仍然知之甚少, 因此 PI 法不能充分表征和评估大流域磷流失潜在风险。但一些学者还是将 PI 法的应用扩展到大尺度的流域, 如 Andersen 等^[40]将 PI 法应用到丹麦的 Odense Fjord 流域(流域面积 1000 km²), 结果表明 PI 法能够很好的预测较大尺度流域的磷潜在流失高风险区域。Birr 等^[29]将 PI 法应用到美国明尼苏达州的 60 个流域(流域面积 40 ~ 5407 km²), 指出 PI 法推广到大尺度流域时, 与受纳水体距离成为迁移过程的一个重要因子, 此外, 还应更加突出土壤侵蚀在磷迁移过程中的作用。

3 PI法在中国的发展和应用

总体来讲,中国农业非点源磷流失潜在风险评价还刚刚起步,尚未真正建立起适合中国农业生产方式的PI法,一些学者在流域尺度PI法的改进和应用做过一些探讨。2003年,张淑荣^[61-62]最早在桥水库流域(流域面积2025 km²)建立PI方法,选取土壤侵蚀、地表径流、潜在污染源距水体的距离、STP、化肥磷施用量和施用方法6个因子,未考虑有机肥的施用以及磷的淋溶作用。因子权重赋值也是采用专家打分法的,没有进行野外校验。李琪等^[63-64]根据Hughes提出的CPRS,建立了适合中国北方农业种植区的PRS。选取了磷肥施用量、时间、方式、STP、土壤侵蚀、年径流深度、受纳水体水质、到河流距离8个评价因子,因子权重的赋值注重数据的可获得性,依据中国的行业标准和实际情况把因子划分为3个危险等级运用到北京官厅水库上游妫水河流域(流域面积1073.6 km²),通过与河流水质进行比较表明建立的PRS具有判定磷流失潜在高风险区的能力。周慧平等^[65]建立适用于大尺度流域PI法,将土壤磷吸持指数和磷饱和度指标作为源因子纳入指标体系中,以反映土壤与磷相互作用对磷流失的影响,同时在迁移因子中增加“污染源距离最终受纳湖体的距离”来反映污染物在迁移过程中随距离衰减的作用,并将其应用到巢湖流域(流域面积13349 km²)。

4 结论

PI法利用现有数据比较全面地考虑导致土壤磷流失的主要因子,不使用复杂的数学模型,具有简便实用的特点;而且可以根据研究区的特征对因子进行修正,具有很强的灵活性与应变能力;此外,注重与GIS技术结合,使得评价结果具有更好的可视性和可操作性。未来PI法的发展主要包括以下4方面:

(1) PI指标方法在因子权重的确定,风险等级的划分等环节做过一些改进,但还存在一定的主观性,这将直接影响到PI值计算和相应的高风险区域确定的合理性,可以利用PI法与非点源模型的结合增加PI评价的准确性;

(2) 目前在大尺度流域内的磷水文动力、迁移转化过程尚不十分清楚,因此PI法主要还是应用于

农田和小流域尺度,而PI法应用于较大尺度流域可以从宏观掌握非点源磷流失的空间差异并实施有效治理。因此,未来大尺度流域PI法的改进应在加强对磷迁移转化机理研究的基础上,主要考虑迁移因子的作用,以及磷在迁移途径中变化情况;

(3) 研究表明^[66]以控制氮流失为目标的有机粪肥的管理反而会增加土壤中磷含量,进而相应地增加地表径流中磷的含量;而能有效减少磷流失的免耕措施则会增加氮的淋溶作用,因此需要发展磷与氮结合的高风险区识别方法,使农业非点源管理措施的制定更加合理;

(4) 中国由于治理非点源污染的财力、物力十分有限,所以应该尽快建立适用于中国的农田和流域尺度PI法以识别磷流失潜在高风险区域,制定相应的管理措施,以提高中国农业非点源污染的控制效率。一些者的探讨和应用证明该方法在中国的应用具有合理性,但该方法在中国农业区的广泛推广还进一步的研究:首先借助GIS、RS等手段进行不同土壤类型的土壤磷含量、土壤侵蚀量等基础数据的调查;其次,考虑自然地理环境、农田排水系统、施肥方式、施肥量等中国自然条件和农业生产方式下对源因子和迁移因子进行修正,以及相应的因子等级划分,在因子确定时要充分考虑数据的可获得性;尤其,国外PI法主要针对的旱作土壤农田,该方法应用到在中国南方水田,还有很多因素需要重新考虑。此外,鉴于磷在流域尺度的迁移转化尚不十分清楚,且一些数据难以获取,所以中国应先尽快建立和推广农田尺度的PI法。

参考文献

- [1] Moss B, Johnes P, Phillips G. The monitoring of ecological quality and the classification of standing waters in temperate regions: A review based on a worked scheme for British waters. *Biological Reviews*, 1996, 71(2): 301-339.
- [2] Correll D L. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(2): 261-266.
- [3] Daniel T C, Sharpley A N, Lemunyon J L. Agricultural phosphorus and eutrophication: A symposium overview. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(2): 251-257.
- [4] 金相灿. 中国湖泊富营养化//金相灿等. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社, 1995: 267-322.
- [5] Sharpley A N, Daniel T C, Edwards D R. Phosphorus

- movement in the landscape. *Journal of Production Agriculture*, 1993, 6(4): 492-500.
- [6] Pote D H, Daniel T C, Sharpley A N, et al. Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff. *Soil Science Society of America*, 1996, 60(3): 855-859.
- [7] Lemunyon J L, Gilbert R G. The concept and need for a phosphorus assessment tool. *Journal of Production Agriculture*, 1993, 6(4): 483-496.
- [8] Gburek W J, Sharpley A N, Heathwaite L, et al. Phosphorus management at the watershed scale: A modification of the phosphorus index. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 130-144.
- [9] Jokela W E, Magdoff F R, Durieux R P. Improved phosphorus recommendations using modified Morgan phosphorus and aluminum soil tests. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 1998, 29(11-14): 1739-1749.
- [10] Jokela W E. Phosphorus index for Vermont: Background, rationale, and questions. Paper presented at Annual meeting of SERA-17 Minimizing P Loss from Agriculture. Quebec City, Canada, 1999.
- [11] Elliott H A, Brandt R C, Kleinman P J A, et al. Estimating source coefficients for phosphorus site indices. *Journal of Environment Quality*, 2006, 35(6): 2195-2201.
- [12] Moore P A, Daniel T C, Edwards D R. Reducing phosphorus runoff and inhibiting ammonia loss from poultry manure with aluminum sulfate. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 37-49.
- [13] Leytem A B, Sims J T, Coale F J. On-farm evaluation of a phosphorus site index for Delaware. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 58(2): 89-97.
- [14] Shober A L, Sims J T. Integrating phosphorus source and soil properties into risk assessments for phosphorus loss. *Journal of Environment Quality*, 2007, 36(2): 551-561.
- [15] Leinweber P, Meissner R, Eckhardt K U, et al. Management effects on forms of phosphorus in soil and leaching losses. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50(3): 413-424.
- [16] Sharpley A N. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus. *Journal of Environment Quality*, 1995, 24(5): 920-926.
- [17] Uhlen G. Surface runoff losses of phosphorus and other nutrient elements from fertilized grassland. *Norwegian Journal of Agricultural Sciences*, 1989, 3(1): 47-55.
- [18] Bechmann M E, Krogstad T, Sharpley A N. A phosphorus index for Norway justification of factors. Paper presented at 7th IWA International Specialised Conference on Diffuse Pollution and Basin Management, Dublin, Ireland, 2003.
- [19] McFarland A L, Hauck J, White W, et al. Nutrient management using a phosphorus risk index for manure application fields. 1998//Manure management in harmony with the environment and society conference proceedings at Ames, IA SWCS. <http://www.ctic.purdue.edu/Core4/Nutrient/ManureMgmt/Paper62.html>.
- [20] Coale F J, Sim J T, Leytem A B. Accelerated deployment of an agricultural nutrient management tool the Maryland phosphorus site index. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(5): 1471-1476.
- [21] Klausner S. Nutrient management: Crop production and water quality. NY: Cornell Cooperative Extension, 1995: 30-41.
- [22] Klausner S, Flaherty D, Pacenka S. Working paper: Field phosphorus index tools for the NYC watershed agricultural program. NY: Cornell University, 1997: 38-40.
- [23] Johnes P J, Heathwaite A I. Modelling the impact of land use change on water quality in agricultural catchment. *Hydrological Processes*, 1997, 11(3): 269-286.
- [24] Gburek W J, Sharpley A N, Folmar G J. Modifying the P index to account for transport pathways. Report to the SERA Transport Workgroup. USDA-ARS, University Park, PA, 1998.
- [25] Sims J T, Simard R R, Joern B C. Phosphorus loss in agricultural drainage: historical perspective and current research. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(2): 277-293.
- [26] Sharpley A N, McDowell R W, Weld J L, et al. Assessing site vulnerability to phosphorus loss in an agricultural watershed. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(6): 2026-2036.
- [27] Coale F J. The Maryland Phosphorus Site Index Technical Users Guide. <http://anmp.umd.edu/files/SFM-7.pdf>
- [28] Jokela W E. A phosphorus index for Vermont//NRAES. Managing nutrients and pathogens from agriculture: NRAES Cooperative Extension, 2000: 302-315.
- [29] Birr A S, Mulla D J. Evaluation of phosphorus index in the watershed at the regional scale. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(6): 2018-2025.
- [30] Lewandowski, Minnesota phosphorus site risk index technical guide. <http://www.mnpi.umn.edu>.
- [31] Weld J L, Beegle D B, Gburek W J, et al. The Pennsylvania phosphorus index: version 1. Penn State College of Agricultural Sciences, Agricultural Research and Cooperative Extension Publication CAT UC180, University Park, Pennsylvania, 2003.

- [32] Baker J L, Laflen J M, Mallarino A, et al. Developing a phosphorus index using WEPP. Paper presented at International Symposium on Soil Erosion Research for the 21st Century, Honolulu, HI, 2001: 79-82 .
- [33] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RULSE). Washington, DC: Government Printing Office, 1997: 312-315
- [34] DeLaune P B, Moore P A, Carman D K, et al. Development of a phosphorus index for pastures fertilized with poultry litter-factors affecting phosphorus runoff. *Journal of Environment Quality*, 2004, 33(6): 2183-2191.
- [35] USDA-NRCS. Phosphorus index for Alabama: A planning tool to assess and manage P movement, 2001. <http://www.aces.edu/departement/aawm/PINDEXFinal2001pdf>.
- [36] USDA-NRCS. Phosphorus index risk assessment procedure worksheet, 2002. USDA-NRCS Ohio Field. http://or.nrcs.usda.gov/pub/agronomy/Phosphorus_Index.
- [37] Beaudet P, Beaulieu R, Bélanger M, et al. Proposition de norme sur la fertilisation phosphatée au groupe de travail interministériel. Paper presented at Groupe technique sur la norme sur le phosphore. Ministère de l'Environnement du Québec, Québec, QC, 1998.
- [38] Kogelamn W J, Lin H S, Bryant R B, et al. A statewide assessment of impacts of phosphorus-index implementation in Pennsylvania. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 59(1): 9-18.
- [39] U.S. Department of Agriculture-Natural Resource Conservation Service. The Florida phosphorus index. Florida Agronomy Field Handbook, Chapter 1, Exhibit 9. Gainesville, Florida USA. 2000. <http://www.fl.nrcs.usda.gov/flgeneral/pifinal.pdf>.
- [40] Andersen H E, Kronvang B. Modifying and evaluating a P index for Denmark. *Water Air and Soil Pollution*, 2006, 174(1-4): 341-353.
- [41] Mallarino A P, Stewart B M, Baker J L, et al Phosphorus indexing for cropland: Overview and basic concepts of the Iowa phosphorus index. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 57(6): 440-447.
- [42] Bundy L G, Ward G L. The Wisconsin Phosphorus Index. 2006. <http://wpindex.soils.wisc.edu/index.php>
- [43] Wolfe M L, Pease J, Zelazny L, et al. Phosphorus index, version 2.0. technical guide. Virginia Tech Blacksburg, VA 24061, Revised October 2005, <http://p-index.agecon.vt.edu/>.
- [44] Johansson R C, Randall J R. Incorporating economics in to the phosphorus index: An application to U. S. Watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 58(5): 224-231.
- [45] Czymmek K J, Ketterings Q M, Geohring L. Phosphorus and agriculture VII: The new phosphorus index for New York State. What's cropping up? 2001, 11(4): 1-3.
- [46] Czymmek K J, Ketterings Q M, Geohring L D. The New York phosphorus runoff index: User's manual and documentation, 2003. http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/extension/PI_User_Manual.pdf.
- [47] Sharpley A. N, Weld J L, Beegle D B, et al. Development of phosphorus indices for nutrient management planning strategies in the United States. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 58(3): 137-152.
- [48] Magette W L. Factors affecting losses of nutrients from agricultural systems and delivery to water resources// Carton O T. Draft Guidelines for Nutrient Use in Intensive Agricultural Enterprises. Teagasc, Johnstown Castle Research and Development Centre, Wexford, Ireland, 1998: 6-31.
- [49] Hughes K J, Magette W L, Kurz I. Calibration of the Magette phosphorus ranking scheme: A risk assessment tool for Ireland. Paper presented at 7th IWA International Specialised Conference on Diffuse Pollution and Basin Management, Dublin, Ireland, 2003.
- [50] Heathwaite L, Fraser A I, Johnes P J, et al. The Phosphorus indicators tool: a simple model of diffuse P loss from agricultural land to water. *Soil Use and Manage*, 2003, 19(1): 1-11.
- [51] Heathwaite A L, Sharpley A, Bechmann M. The conceptual basis for a decision support framework to assess the risk of phosphorus loss at the field scale across Europe. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2003, 166(4): 447-458.
- [52] Beaulieu L, Gallichand J, Duchemin M, et al. Sensitivity analysis of a phosphorus index for Québec. *Canadian Biosystems Engineering/Le génie des biosystèmes au Canada*, 2006, 48(1): 13-24.
- [53] Djidic F, Bergström L. Conditional phosphorus index as an educational tool for risk assessment and phosphorus management. *Ambio*, 2005, 34(4): 296-300.
- [54] Bechmann M, Krogstad T, Sharpley A N. A phosphorus index for Norway. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B Soil and Plant Science*, 2005, 55(3): 205-213.
- [55] Bechmann M E, Stålnacke Per, Kværnø S H. Testing the Norwegian phosphorus index at the field and subcatchment scale. *Agriculture Ecosystems Environment*, 2007,

- 120(2-4): 117-128.
- [56] DeLaune P B, Moore P A, Carman Jr. D K, et al. Evaluation of the phosphorus source component in the phosphorus index for pastures. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(6): 2192-2200.
- [57] Sharpley A N. Identifying sites vulnerable to phosphorus loss in agricultural runoff. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(6): 947-951.
- [58] Veith T L, Sharpley A N, Weld J L, et al. Comparison of measured and simulated phosphorus losses with indexed site vulnerability. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 2005, 48(2): 557-565.
- [59] Magette W L. Identifying diffuse pollution sources using multicriteria analysis. Paper presented at 2002 ASAE Annual International Meeting. Chicago, Illinois, 2002.
- [60] Hughes K J, Magette W L, Kurz I. Identifying critical source areas for phosphorus loss in Ireland using field and catchment scale ranking schemes. *Journal of Hydrology*, 2005, 304(1-4): 430-445.
- [61] 张淑荣, 傅伯杰, 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): 263-270.
- [62] 张淑荣, 陈利顶, 傅伯杰. 农业区非点源污染敏感性评价的一种方法. *水土保持学报*, 2001, 15(2): 56-59.
- [63] 李琪, 陈利顶, 齐鑫, 等. 流域尺度农业磷流失危险性评价与关键源区识别方法. *应用生态学报*, 2007, 18(9): 1982-1986.
- [64] 李琪, 陈利顶, 齐鑫, 等. 奶水河流域尺度农业磷流失危险性评价与关键源区识别方法. *环境科学*, 2008, 29(1): 32-39.
- [65] 周慧平, 高超. 巢湖流域非点源磷流失关键源区识别. *环境科学*, 2008, 29(10): 2696-2702.
- [66] Heathwaite A L, Sharpley A N, Gburek W J. A conceptual approach for integrating phosphorus and nitrogen management at watershed scales. *Journal of Environment Quality*, 2000, 29(1): 158-166.

Review of Risk Assessment of Phosphorus Loss Potential from Agricultural Non-point Source: Phosphorus Index

LI Na, GUO Huaicheng

(College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Diffuse phosphorus discharge from agricultural nonpoint sources has become one of the main causes of eutrophication of surface water. Agricultural NPS pollution can be widely distributed and there is an uncertainty in temporal and spatial distribution, so it is difficult to control and prevent it. Now the valid way to improve the efficiency of control is identifying high risk areas of P loss and then making corresponding measurements. PI based on GIS is a simple risk assessment tool and can identify the high risk areas effectively. This paper reviews the key techniques of P index, including the P loss factors which are taken into account in P indices and modifications of calculation of PI value, and then analyzes the using extent and scale.

Key words: phosphorus index; risk assessment; agricultural non point source; high risk areas identification

本文引用格式:

李娜, 郭怀成. 农业非点源磷流失潜在风险评价: 磷指数法研究进展. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1360-1367.