#### DOI: 10.5846/stxb202103120678

冯青郁,陈利顶,杨磊.农业政策环境扩展模型在我国农业面源污染研究中的应用.生态学报,2022,42(5):1665-1678. Feng Q Y, Chen L D, Yang L. Review on the potential of applying the APEX model for non-point source pollution in China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5):1665-1678.

# 农业政策环境扩展模型在我国农业面源污染研究中的 应用

冯青郁<sup>1,2</sup>,陈利顶<sup>1,2,\*</sup>,杨 磊<sup>1,2</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心,城市与区域生态国家重点实验室,北京 1000852 中国科学院大学,北京 100049

摘要:我国的面源污染问题逐渐受到政府和科学界的重视,然而面源污染是一个复杂的系统过程,涉及多种因素和多个过程。 面源(NPS)污染模型作为解决面源污染相关问题的研究和管理工具,在进行面源污染总量估算和严重程度评价、污染物流失路 径和影响因素分析、治理策略制定等方面都有重要的作用。在我国,虽然针对面源污染模型进行了大量相关研究,既包含对基 于国外模型的应用与验证,也包含基于观测数据自主研发的模型,但仍然存在模型应用和验证案例不足、已有的模型应用同中 国面源污染特征结合不足、模型发展同面源污染机理研究结合不足等问题,而农业政策环境扩展(APEX)模型在应对这些问题 上具有一定的优势。结合我国面源污染模型相关研究存在的问题、APEX 模型模块和研究进展进行了介绍,对 APEX 模型在我 国面源污染相关问题的研究中涉及的畜禽养殖、复杂耕作系统、特定 BMP 和水稻田的模拟等相关问题的应用前景进行了探讨, 以期能够促进我国农业面源污染模型的发展。

关键词:农业政策环境扩展(APEX)模型;面源(NPS)污染模型;水文循环;氮磷流失;土壤侵蚀;有机肥模拟

# Review on the potential of applying the APEX model for non-point source pollution in China

FENG Qingyu<sup>1,2</sup>, CHEN Liding<sup>1,2,\*</sup>, YANG Lei<sup>1,2</sup>

State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Science, Beijing 100085, China
University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract: The serious problem of non-point source (NPS) pollution is increasingly concerned by both the Chinese government and academic scholars. However, NPS pollution is a complex problem, which required systematic understanding of related processes contributing to NPS pollutant losses and major factors affecting these processes. For NPS pollutant loss related researches and application cases, NPS models is an important tool for conducting relative researches and assisting policy makers in determining proper, economic, and effective measurements to reduce NPS pollutant loads. The NPS models have been applied to solve many problems, which included identifying major pollutant type, estimating total load of major pollutants, identifying paths through which pollutants losses and major factors affecting the corresponding paths, and developing strategies for reducing NPS pollutants. In China, large number of researches have been conducted on the development and application of NPS models. These activities are dominated by adoption and verification of NPS models for China. However, there are still many problems in development and application of NPS related models in China. These

基金项目:国家自然科学基金项目(42077057)

收稿日期:2021-03-12; 网络出版日期:2021-11-17

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liding@ rcees.ac.cn

problems include limited model application and verification, lack of consideration on characteristics of the NPS pollution in China, and lack of incorporating advances in NPS theories to model development. The APEX model has some advantages in solving these problems over other NPS models and made it a prospective tool to solve NPS pollution related problems in China. This paper analyzed the potential of applying the APEX model in researches for the NPS pollution in China. In this review, the problems identified in reported papers on NPS models were summarized by reviewing existing papers on application of the APEX model under the natural and agricultural conditions in China. This is followed by detailed description of 12 major modules included in the APEX model, as well as explanation on application capabilities of the model. Then, existing papers on the APEX model were categorized based on the major research topics, including review papers, papers on development of user interface for the model, on model improvement, on sensitivity analysis of model parameters, parameter optimization, on applying models for scenario simulation, etc. In addition, the prospective of applying the model in simulating specific NPS pollution problems such as poultry, complex tillage system, localized BMP and rice paddy was described. This paper will provide some supports for the NPS model development in China.

**Key Words**: Agricultural Policy Environmental Extender (APEX) model; non-point source (NPS) pollution; hydrologic cycle; nitrogen and phosphorus loss; soil erosion; manure simulation

近半个世纪以来,我国面源污染问题变得日益突出,并在近期内不会得到快速缓解<sup>[1]</sup>。面源污染的来源 通常被归类为三个来源,种植业源、畜牧养殖业源和农村生活源<sup>[2]</sup>。20世纪80年代以来,我国的农业发展最 大的特点就是伴随着粮食产量提高而急剧增加的化肥使用量。尽管我国经过实施由2015年制定的《到2020 年化肥施用量零增长行动方案》已经极大的控制了化肥使用量的增长速度,但现有的化肥使用量仍然很大, 占世界化肥使用总量的三分之一左右。调查显示,我国的化肥利用率很低,只有35%左右<sup>[3]</sup>,因此很大一部 分化肥施用之后流失到水体或者空气中去。此外,人民生活水平的提高所带来的对动物性蛋白质需求的增 加,也导致我国规模化畜牧养殖业的快速发展。尽管规模化养殖具备相关污染物处理设施,分散养殖所带来 的污水、动物粪便等则由于没有足够的配套处理措施而大量排放,向水体中排放了大量的氮、磷等污染物。而 对于生活源,城市生活污水大部分可以被引入污水处理厂进行处理,农村生活污水则常常不经处理直接排放, 此外农村生活垃圾等的随意堆放也会在降雨等过程发生时进入到水土环境中<sup>[4-5]</sup>。

面源污染问题的解决是一个长期的、系统的工程。这是由农业面源污染来源广泛且分散、流失过程复杂、 空间异质性大等特点决定的<sup>[6]</sup>。针对农业面源污染的源头和过程本身,需要解决的问题可以总结为总量估 算、路径分析、治理措施三个类别。总量估算的研究内容包括主要污染物识别、受纳水体最大负荷量估算、污 染严重程度的估计和判断标准的定级等方面;而路径分析则包括主要源头、流失路径以及各个流失过程中的 影响因素识别和强度大小分析等方面;治理措施则包括源头、流失过程中以及受纳水体中的污染物减少措施 的种类选择、空间布设格局、长短期效应评价、投入产出分析等。除此之外,还需要结合人口变化、经济发展、 气候变化、政府决策、城镇化等方面来分析上述三类问题可能受到的影响以及潜在的系统解决方案。

在对面源污染相关问题的分析、解决方案探索和科学研究过程当中,都需要借助于面源污染相关模型来进行<sup>[7]</sup>,这主要是由两个方面决定的。首先,构建模型是系统结构和行为认知的有效手段。从上面的分析可以看出,面源污染问题的发生无论是从源头到过程都是一个复杂的系统过程,涉及多个因素和过程,需要借助模型的构建来对该问题进行整体地认知和研究。其次,试验同模型的结合是快速寻找解决方案的重要途径。 仅仅通过野外或者田间试验研究,受限于资源和实地条件,无法进行不同解决方案间的效果对比以获得更高效的方案选择。面源污染模型的主要任务是通过尽可能准确地模拟面源污染所涉及的生态过程来估算污染物的流失量、判断流失路径、确定不同影响因素的敏感程度、评价不同治理措施的效果以及布设位置的变化,最终为合理制定面源污染治理策略提供科学依据。此外,面源污染模型同其他诸如社会经济、地下水、气候变化等模型耦合,用于研究这些相关的因素对面源污染源头和过程的影响。 目前常用的面源污染模型有很多,包括 Soil and Water Assessment Tool(SWAT)<sup>[8]</sup>、Agricultural Policy Environmental Extender(APEX)<sup>[9]</sup>、Hydrological Simulation Program Fortran(HSPF)、Annual Agricultural Non-Point Source (AnnAGNPS)、Export Coefficient Method (ECM)<sup>[10]</sup>、Long Term Hydrologic Impact Analysis (L-THIA)、Storm Water Management Model (SWMM)等模型,这些模型都在农业面源污染相关的研究和治理政策 制定方面做出了很多的贡献。不同模型关注的问题相近,但又各有侧重。比如 SWAT 和 HSPF 模型主要是为 在中到大流域上进行模拟应用涉及,这是由于该模型具备相对完整的河道泥沙和化学物质运移模拟模块,而 AnnAGNPS 则对细沟和浅沟有更好的模拟,且更侧重于小流域的土壤侵蚀污染模拟<sup>[11]</sup>,SWMM 模型更加侧重 于对城市面源污染的模拟<sup>[12]</sup>,而 ECM 模型则是一个依据经验获取输出系数对面源污染负荷进行评价的经验 性模型<sup>[13]</sup>。APEX 模型则更适用于小流域或者田块尺度的研究,也很适合我国以小流域为单元进行面源污染治理的政策和传统<sup>[14]</sup>,然而该模型在我国的应用还非常有限<sup>[15]</sup>。因此,本文的主要目的是在对中国的面 源污染特征以及面源污染模型相关的研究总结的基础上,结合 APEX 模型的特点对其在解决中国面源污染问 题上的应用前景和需要改进的方向进行探讨。

#### 1 中国面源污染特征

我国特有的一些社会、经济和自然环境特征,造成了我国农业面源污染具备以下三个主要的特征:

1.1 点源面源污染混合排放

在我国,虽然经过严格的法律法规的出台和实施,我国由工业生产产生的点源污染得到了很好的控制,但 是点源污染对水体污染的贡献仍然占有不小的比例,主要是由于一些企业不遵守规定,存在偷排现象。此外, 由畜禽养殖、生活污水等产生的点源污染仍然十分普遍。虽然理论上可以识别这些污染源头,应当归结为点 源,但又由于居民生活和畜禽养殖的分散分布,要准确识别源头和路径非常困难。因此可以说这些点源同传 统的种植业面源是混合发生的<sup>[6,16]</sup>。

1.2 流失路径错综复杂

我国幅员辽阔,地形、气候、土壤等基础条件地理的差异导致了驱动面源污染发生的水文循环的机制和结构都有很大差异。比如径流包含超渗、蓄满等两种主要的产流机制在不同的地区就会有很大差异。在排水系统中包含了大量的人工排水沟渠和城市排水管道,在很大程度上改变了汇流过程。这也是导致点源面源混合排放的一个重要因素。在平原灌区,流失路径则以淋溶以及地下水迁移为主的运移为主。此外,我国的土地所有制和种植习惯影响,在土地边界起垄是非常普遍的现象,一方面作为土地所有者之间的分界,更重要的是地垄的存在是为了保水,极大地改变了地块之间地表的水文和污染物的流失过程<sup>[16]</sup>。

1.3 农业种植系统复杂多样

这主要是由各个地区的农业种植传统、经济发展水平、饮食生活习惯等也都各不相同。我国种植制度从 南到北逐渐由一年三熟向一年一熟过渡,不同的熟制区又会有不同的主要作物类型和轮作方式,如水稻-小 麦-蔬菜、小麦-油菜、小麦-玉米等。此外,我国广泛推广的间作套种等种植方式,导致其耕作、施肥、收获等的 方式既复杂又多样化,对面源污染的贡献也各不相同。加上农业发展程度和人口分布的不同,各地的人均耕 地面积和种植规模也有很大差异,这就导致了不同的种植作物集约化的程度不同,有些以机械化为主,而有些 则仍然需要以人力来进行农事管理。

#### 2 我国面源污染模型相关研究及其问题总结

我国面源污染模型的相关研究的主要特征是起步较晚,以借鉴和应用国外的模型为主,同时也包含一些 自主开发的模型。国外的面源污染模型中,SWAT和 ECM 两个模型在我国应用最为广泛。最初以模型直接 应用为主,对太湖、滇池、三峡库区以及密云水库等面源污染严重地区进行污染负荷总量估算<sup>[17-20]</sup>、来源解 析<sup>[21-22]</sup>、影响因素剖析<sup>[23-26]</sup>和治理措施效果评价<sup>[27-28]</sup>。随着对模型的特点、不足和在应用中出现的适用性 等问题的认识逐渐深入,不少学者开始关注模型的机理改进<sup>[29]</sup>、不确定性<sup>[30-31]</sup>、参数和输入数据敏感 性<sup>[32-34]</sup>、数据缺失<sup>[35-36]</sup>等方面开展研究,并将应用领域扩展为最优化管理措施的配置<sup>[28, 37]</sup>、未来气候变 化<sup>[38-39]</sup>、水功能区划分<sup>[40]</sup>、城镇化<sup>[27, 41]</sup>、景观生态<sup>[42]</sup>等问题进行深入探索。除了这两个模型之外,文献中 还出现了对其他的模型如 AGNPS<sup>[43-44]</sup>、LTHIA<sup>[45]</sup>、PLOAD<sup>[46-47]</sup>、GWLF<sup>[48]</sup>、SWMM<sup>[41]</sup>、Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs(INVEST)<sup>[49]</sup>、HSPF<sup>[50]</sup>等面源污染模型的验证和情景预测相关的应用与研 究。在面源污染模型自主研发方面,模型构建的方式主要以统计<sup>[51-52]</sup>和指标体系构建<sup>[53-54]</sup>两种方式为主。 无论是借鉴国外的模型,还是依据我国的条件和数据进行面源污染模型的自主研发,目前都还存在一些共性 的问题需要解决。这些问题主要包括:

#### 2.1 模型的应用和验证案例研究仍然非常有限

从不同面源污染模型相关文献当中出现的校正和验证周期都很短,这一现象反映出来面源污染研究所需的基础数据缺乏。造成这种现象的原因包括政府相关部门数据不公开、监测网络不够健全、研究者之间数据 不共享、研究力量分散、支持面源污染相关研究的研究项目周期较短等。在使用国外引进的基于物理机制的 模型,往往都需要长期(3到5年左右)的观测数据作为模型校正和验证。对于自主开发的模型,同样需要长 期的数据支持才能够更好地分析面源污染发生的规律。

# 2.2 模型应用中对我国面源污染特征结合不够

直接应用国外的面源污染模型的局限性在于这些模型的发展机理大都是基于国外的农业环境条件进行 开发的,无法直接应用于我国不同地区的面源污染相关过程。一方面是由于国内的面源污染模型相关教育和 培训严重不足,大多是拿来主义,对模型的基本原理、运行机制、预测能力等认识非常有限。尽管近些年来已 有些改观,开始有一些相关不确定性、模型机理改进等相关的研究,但是大多数学者对面源污染现象的系统性 和模型所涉及的机理认识不足这一现象没有实质性的改变,也就导致了部分研究中对模型的应用方法、情景 的设置、模拟结果的解释都存在提升空间。另一方面,当前的模型相关研究主要集中于内陆水体的面源污染, 我国海岸线较长,入海河流较多,其面源污染问题对海洋环境的影响也需要引起重视,特别是面源污染所引起 的富营养化等问题,对近海渔业和海洋生物的生长都有较大的负面作用,目前国内在这方面的相关研究还非 常有限。

2.3 同面源污染发生机理研究的结合不够

随着我国学者对面源污染严重性的认识,相关的机理研究逐渐增多,但是机理研究和模型研究往往脱节, 没有能够将机理研究的成果及时总结应用到模型当中去。这方面的主要原因是我国目前的科研评价体制重 基础轻应用。模型的开发与改进对科研人员包含对机理认识、数学、计算机等方面的综合能力有较高的要求, 同时也需要大量的时间投入,但无法产生足够可量化的科研成果,导致这方面的研究进展非常缓慢,也导致了 在现有文献当中以直接应用模型为主,对模型的开发也往往浅尝则止,开发出来的模型由于缺乏足够的验证, 导致模型推广的潜力低。

## 3 APEX 模型介绍

APEX 模型由美国农业部农业研究局于 1980 年代开发,主要是用于解决农场或者小流域尺度面源污染 相关过程无法模拟的问题<sup>[55]</sup>。在 APEX 开发之前,在美国农业部农业研究局(United States Department of Agriculture, Agriculture Research Service, USDA-ARS)的模型开发工作中,主要以 Environmental Policy Impact Climate(EPIC)和 SWAT 两个模型为主。EPIC 模型属于田块尺度的模型,主要用于模拟田块尺度上的水文、 土壤侵蚀、化学物质迁移转换、作物生长、耕作管理等过程。在一个针对畜牧业和环境关系的国家先导项目 (National Pilot Project for Livestock and the Environment)中,对不同有机肥管理情景在农场和小流域尺度上的 模拟需求激发了在 EPIC 的基础上进行 APEX 模型的开发。模型的开发思路是将 EIPC 模型的田块模拟结果 连接起来,以实现对农场上畜牧养殖的规模和养分管理措施、土地利用等因素在大农场或者小流域上对面源 污染相关过程的影响评价。

APEX 模型是用 Fortran 语言编写的一套计算机程序,它包含了 12 个主要的模块,包括气象、水文、植物生 长、管理措施、土壤侵蚀、碳氮循环、磷循环、农药、土壤温度、经济核算、模拟单元间的汇流演算、水库水塘模块 等。在运行过程中,一个农场或者小流域首先按照土壤、土地利用和地形条件划分为水文响应单元。模型主 要以日为计算步长(也可以进行次降雨的模拟),首先计算各个水文响应单元上各个模块上水文过程、植物生 长、土壤侵蚀、化学物质循环等状态变化,然后将水文循环按照汇流路径汇集到农场或者小流域出口,最后计 算泥沙、化学物质等在运移过程中和出口的变化情况。在这些过程中,模型还可以加入管理措施、气候条件等 因素对各个状态变化的影响。在模型构建时,需要输入的数据包括气象、土壤、土地利用、地形等数据。 3.1 气象模块

气象是模型在计算各个过程时所需要的主要驱动力。模型运行需要的气象参数包括降雨量、最高最低气 温、风速、太阳辐射和相对湿度。以日为主要计算时间步长决定了日尺度的气象输入数据。如果用户没有所 有的参数,则需要输入月尺度各个参数常年统计值,包括各个气象参数的平均值、标准差、偏斜系数等参数 (详见模型用户手册)。模型将通过内置的基于一阶马尔科夫链的算法将月尺度数据降维成日尺度数据。 3.2 水文模块

该模块主要基于水文平衡理论,包含了水循环中植 被截留、地表径流、入渗、土壤水分纵向和横向运动、土 壤蒸发、水库、水、地下水、河道运移等所有重要的水文 组分(图1)。地表径流的计算包含两种方法:一种基于 经验的径流系数法改进版本(Curve Number Method), 另外一种是基于物理过程的 Green Ampt 法。对径流系 数法的改进主要是在模拟过程中,依据土壤水分状况来 确定每日土壤初损参数(soil retention parameter)。峰值 流速则包含修正的推理公式法 (Modified Rational Formula)和TR-55法(Technical Release No 55)。流域 汇流时间的计算包括了地表、浅沟和沟道汇流三个阶段 的时间,主要都是基于曼宁公式进行计算。对于蒸散发 量的计算,模型包括了 Penman、Penman-Monteith、 Priestley-Taylor、Hargreaves、Baier-Robertson 等 5 个计算 公式,这些公式的计算精确度、对数据的需求和适用的 条件都有不同,用户可以依据自己使用场景进行选择。 **3.3** 植物生长模块





**Fig.1** Flowchart for hydrologic cycle module of the APEX model APEX:农业政策环境推广模型 Agricultural Policy Environmental eXtender

APEX 模型的植物生长模块是基于 EPIC 模型,也是一个在其他诸如 SWAT 等水文模型中常用的作物生 长模块。该模块基于叶面积指数的变化和植物的光合效率,可用于模拟农作物、树木和其它类型的植物,包括 一年生和多年生。模型中也包含了超过 150 中常见植物的生长参数数据库供用户选择。整个作物的生长是 通过积温来控制的。在计算过程当中会依据水分、温度、空气、养分和铝毒五个方面的胁迫来确定每天实际生 物量变化以及植物对氮磷养分的吸收量。并将累积的生物量分为地上和地下两部分,用于产量估计。此外, 模型还会计算植物的高度变化和豆科植物的固氮量。该模块的一个特点是考虑了间作复种,每个水文响应单 元允许多达 10 种作物同时生长,并以叶面积指数为主要因素来计算作物对光、热和养分的相互竞争。

# 3.4 管理措施模块

模型可模拟的管理措施可以分为两大类。一类用于管理植物生长施,这一类措施主要包括播种、施肥、耕 作、灌溉、农药施用以及收获等常规的田间管理措施,也包含例如针对棉花的轧棉、针对水稻的蓄排水、垄作、

5 期

放牧、割草、地表覆盖(如地膜、薄土)、田间排水等满足不同需求的措施。另一类用于控制面源污染相关过 程,这些最优管理措施又可以细分为结构性措施、管理型措施和沟道措施三种类型。结构性措施包括淤堤坝、 植被过滤带、护坡工程、绿色屋顶、透水地面、沉沙池、梯田、人工湿地等。管理型措施包括退耕还林还草、有机 肥施用、免耕、雨水灌溉、景观格局演变、轮作复种、养分管理等。沟道措施包括河道保护、河岸保护带、河岸覆 盖以及河道修复等。各类管理措施的模拟主要是依据各措施的特点及其作用机理,在相应的过程中设置参 数,通过改变地表(如粗糙度、透水性)、河道(如曼宁系数、坡度)或者养分的多少等来对相应的生态过程进行 干扰,以实现对措施效果的评价。

作为该模型的一个特色,它还包含了对畜禽养殖和有机肥管理的模拟。在每一个模拟单元中,都可以设 置一个业主,每一个业主可以养殖10群以下的牲畜或家禽。模型中提供了包含猪、牛、鸡、鸭等常见的畜禽种 类,然而,每个模拟单元只允许有一群牲畜或者家禽。这些畜禽可以通过圈养或者散养的方式进行养殖。如 果是散养放牧,用户则可以设定放牧的频率以及每年的固定放牧时间。对于有机肥的管理,圈养可以设置一 个固定大小的蓄粪池,作为有机肥的施用来源,以液态或者固态有机肥的形式按用户设定的频率施用到指定 水文响应单元中。

3.5 土壤侵蚀模块

该模块可模拟水力和风力侵蚀。水力侵蚀的计算主要是基于通用土壤流失方程及其变化版本,提供了包括通用土壤流失方程(Universal Soil Loss Equation, USLE)、Onstad-Foster 对 USLE 的修改版本、USLE 的其他修改版本(包括 Modified USLE, MUSLE Theoretical Version-MUST, MUSLE Small watershed version-MUSS, MUSLE using input coefficients-MUSI, Revised USLE, RUSLE),第二代 RUSLE(RUSLE2)等在内的 8 个公式。各个公式中基本都包含了侵蚀力、土壤可蚀性、坡度坡长因子、作物因子和控制措施因子。在进行水力侵蚀的计算时,用户可以从 8 个公式中选择一个来进行水力侵蚀量的计算。在进行水力侵蚀计算之外,如果用户在管理措施中施用了有机肥,则会采用类似于水力侵蚀的公式进行有机肥的侵蚀量计算。风力侵蚀模块采用的是风力侵蚀连续模拟(Wind Erosion Continuous Simulation, WECS)模型。该模型要求每天的风速分布来计算侵蚀驱动力。首先计算在光滑裸露土壤表面的最大风力侵蚀量,然后结合土壤属性、地表粗糙度、地表覆盖和模拟单元的长度来调整最大风力侵蚀量以获得实际的风力侵蚀量。

3.6 碳氮循环模块

该模块是基于 Century 碳循环模型中的土壤有机质子模块进行开发。碳氮循环的示意图详见图 2 和图 3。在该土壤有机质子模块中,土壤有机质分为包含快速分解的新鲜有机质库、分解较慢的活性有机质库和难 以分解的惰性有机质库,并模拟各个库之间的相互转化以及向环境中的流失。除此之外,模型还将依据有机



图 2 APEX 模型种的碳循环模块示意图







Fig.3 Flowchart for nitrogen cycle module of the APEX model

质和无机碳氮之间转化导致的土壤有机质含量的变化, 每年对土壤容重进行调整。在氮循环中,模型还考虑了 无机形态氮之间的转化,为作物提供生长所需氮素。模 型包含了完整的氮循环过程模拟,包括硝化、氨化、反硝 化、被植物吸收利用等过程。当获得土壤中有机和无机 形态的碳氮含量之后,模型将结合水文、土壤侵蚀和作 物生长模块的计算结果来计算它们的流失量和吸收量。 3.7 磷循环模块

该模块是基于受降雨碳氮矿化速率限制的干旱区 草地产量模型(Production of Arid Pastures Limited by Rainfall and Nitrogen mineralization model, PAPRAN)进 行开发,其示意图见图 4。在该子模块中,土壤有机质 分为两个库,一部分是新鲜有机质库,包括植物残差和 微生物,另一部分是惰性有机质库,主要有土壤腐殖质 组成。模型首先依据不同的分解速率、新鲜有机物中有 机态磷的含量以及同碳氮循环中提到的土壤环境控制



Fig.4 Flowchart for phosphorus cycle module of the APEX model

因子来计算这两个部分到快速磷酸盐的矿化速率。而对于无机态磷,模型考虑三种形态,快速磷酸盐、慢性磷酸盐和稳定磷酸盐,以及它们之间的相互转化。在获得稳定的土壤有机和无机态磷含量之后,土壤中的磷主要通过被作物吸收、随土壤侵蚀、随地表径流但中途经被移除。

# 3.8 农药模块

该模块是基于农业管理对地下水流失效应模型 (Groundwater loading effects of agricultural Management System, GLEAMS)中的农药模块进行开发的,其示意图 详见图 5。首先,农药通过叶面施用或根系施用两种方 式来施用。使用叶面施肥方式施用的农药由于施用效 率的不同,一部分在施用过程中便损失到空气中,另一 部分将留在植物叶面或者透过植被直接施用到地表,透 过植被直接到达地表部分的量由植物的叶面积指数决 定。留在植物叶面的部分在降雨时也会被冲刷到地面。 在计算各个部分的量之间的变化之后,计算在土壤中随 土壤水运动的浓度,最终分别计算进入随纵向流向下进 入地下水的流失量和随横向流进入河道的流失量。





3.9 土壤温度模块

在模型中,对涉及微生物过程的土壤有机质的硝化和氨化过程、融雪过程、以及植物根系生长过程的模拟 都受到土壤温度的影响,因此模型包含了对土壤温度的计算模块。在该模块中,对每一层土壤温度的计算主 要考虑了土壤深度、前一天土壤温度、区域多年平均温度、地表温度和阻尼深度等的影响。其中,对地表温度 的计算考虑了地表空气温度、地表覆盖(枯落物或者积雪)两方面的影响。每一层的阻尼深度受到土壤容重 和水分含量的影响。

## 3.10 汇流模块

该模块主要模拟各个模拟单元模拟结果中包含的径流、泥沙和养分等在河道中的运移直到农场或者小流 域出口的过程。每个模拟单元被假设包含两条虚拟河道,一条为集流河道,另一条为汇流河道。当集流河道

长度等于汇流河道长度时,该模拟单元被认定为集流单 元,即该模拟单元没有上游模拟单元来水;当集水河道 长度不等于汇流河道长度时,该模拟单元将被定为汇流 单元,即该模拟单元除了获得自身的径流之外,还将获 得从上游模拟单元汇集而来的径流(图 6)。在汇流演 算中,首先计算各个河道中的流量和流速。如果流量过 大超过了河道容量,河道径流将溢出,形成河漫滩,并计 算河漫滩的径流流量和流速。模型提供了基于日径流 量进行的汇流演算和基于小时尺度的洪水过程汇流演 算两种方法来进行河道和河漫滩的汇流演算。在河道 径流汇流演算的基础上,进行泥沙、氮、磷和农药的运移 过程。泥沙的运移采用拜格诺德公式,依据流量大小、 不同粒径的泥沙浓度和径流挟沙力进行计算。如果泥 沙浓度小于挟沙力,模型将考虑河岸侵蚀,反之则产生 河道沉积。对于有机态氮磷的运移,模型采用富集比例 (Enrichment Ratio)计算,即河道入流泥沙平均粒径分 布同出流泥沙平均粒径分布的比值。模型中暂不包含 对污染物在河道中的转化过程的模拟。



#### 图 6 APEX 模型汇流模块示意图

#### Fig.6 Illustration for flow routing in the APEX model

图中1、2、3、4、10、11模拟单元为集流单元,其余为汇流单元,出口在12单元;在该示意图中,对于各个集流单元,1、2的模拟结果汇入6中,3的模拟结果汇入7中,10的模拟结果汇入9中,4的模拟结果汇入5中,11的模拟结果汇入12中;进入汇流单元之后,5的模拟结果汇入8中,7的模拟结果汇入6中,6、8的模拟结果汇入9中,9的模拟结果在汇入到出口所在的单元12中

3.11 收支核算模块

该模块的主要功能是核算作物种植过程中的资金

成本和农产品卖出获得的收入,供用户进行效益预估和风险评价。模型将成本分为随产量变动成本和不随产 量变动成本两个种类。成本核算从模拟开始到作物收获为一个周期,收获之后的耕作成本算入下一个核算周 期。收入核算通过农产品产量和价格的乘积来计算。在模拟过程中,模型将对每一种作物种植过程中的每一 个管理措施所涉及的成本和收入进行核算。该核算模块的价值在于通过同作物生长过程状况和对养分需求 模拟的结合,来系统的分析农业政策、气候变化、市场变动、管理措施和土壤肥力状况等方面对农业生产的 影响。

#### 3.12 水库模块

该模块主要通过物质平衡的方式模拟水库的水量、泥沙含量、氮磷养分和农药含量的变化。在模型中,用 户可以在任何一个模拟单元设置水库,并可以为每个水库设置主要和紧急溢洪道。水库的水量变化主要包括 库容、入流流量、库区降雨量、水面蒸发量、渗漏速率和出口流量的变化。水库中泥沙含量的变化则由库水泥 沙含量、库容变化量、入库泥沙量、出库泥沙量、泥沙沉积量的变化决定。水库中的氮磷养分和农药含量的变 化是依据入库和出库水量和泥沙量的变化、氮磷养分和农药的浓度分别计算的。

#### 4 APEX 模型相关研究及其应用简述

APEX 模型最初开发的目的是为了满足美国关注于畜牧业和环境关系的国家先导项目中对畜牧养殖带来的水质和其他环境问题进行评价。Gassman 等<sup>[55]</sup>关于 APEX 模型的综述中对该项目以及 APEX 在项目中的应用进行了详细的介绍,并对 APEX 模型在不同的田块、小流域甚至中尺度的流域进行的验证和应用进行了评述。自发布之日起,模型的开发者就对不断地进行改进和验证,主要的改进里程碑包括增加自动管理畜牧养殖区域的有机肥管理模块以提高模型在区域放牧模拟的适应性、对美国中西部普遍存在的埋管排水现象的模拟验证、对水库和林地水文过程的模块进行改进、加入 Century 模型的碳循环模块、完善河道汇流模块、以及对模型性能的提升来增加对包含多个子流域的区域模拟等。

在已发表文献中出现的同 APEX 模型相关的研究可以分为如下几类:对 APEX 发展历史进行总结的综述 性文章<sup>[55]</sup>、模型界面开发的文章<sup>[56-58]</sup>、模型理论的改进<sup>[59-61]</sup>、模型的参数最优化技术<sup>[9,62]</sup>和敏感性分析技 术<sup>[63-64]</sup>、以及模型在不同场景的验证和应用案例<sup>[65-69]</sup>等几个方面。近 20 年来,随着 APEX 的不断发展完善 和在不同场景下的应用验证,其功能、易用性、模拟经度等都得到了大幅度的提升并被应用于养殖场<sup>[65]</sup>、水稻 田<sup>[70]</sup>、林地<sup>[71]</sup>等多种景观类型上进行 BMP 措施、气候变化等对农业面源污染的影响评价方面。目前,APEX 模型最广泛的应用是在美国农业部的保护性耕作效果评估项目(Conservation Effect Assessment Project, CEAP)中,对农业部广泛推行的多种 BMP 措施效果进行评估,并同 SWAT 模型一起构成了该项目评价的主要 工具。

#### 5 APEX 模型在中国面源污染问题的应用前景分析

APEX 模型机理介绍和应用研究综述表明,该模型包含了面源污染主要过程,并且在面源污染研究所涉及的总量估算、路径分析、治理措施等问题都有充足的应用和验证。更重要的是,该模型在结合我国面源污染特征方面有先天的优势。除了包含其他诸如 SWAT、HSPF 和 AnnAGNPS 等都有的可以同时模拟点源面源污染之外,还包含有一些其他模型所不具备的特点。主要体现在以下几个方面:

5.1 模拟单元设置灵活

模型对于研究区的分解方式是将单个的田块或者子流域通过汇流模块连接起来构成一个大农场或者小流域,这是由于 APEX 是在田块尺度的 EPIC 模型基础上耦合河道汇流模块而形成。这使得该模型除了可以 被应用于基于 DEM 确定的小流域集水单元,也可以被应用于大型农场,甚至由人工排水沟连接的小田块组成 的田块群。

5.2 对畜禽养殖和有机肥管理的模拟

我国面源污染中一个重要的来源就是畜禽养殖,而对畜禽养殖场的模拟是 APEX 模型在开发初期重点要 解决的问题<sup>[65,72]</sup>。模型包含了对养殖场规模、畜禽数量、养分处理和利用方式、有机肥施用和侵蚀等的计算, 可以有效地对畜禽养殖产生的面源污染物进行溯源、总量计算、以及不同管理措施进行模拟。需要指出的一 点是,该模块基于美国的畜禽养殖方式进行开发,在应用于我国的畜禽养殖模拟时需要验证,必要时需要进行 模块功能扩展以适应我国畜禽养殖模式的模拟。

5.3 模拟复杂的耕作系统

APEX 模型中的作物生长模块包含了对不同作物对光和水资源的竞争、耕作方式等的模拟,并且允许同一个模拟单元同时生长 10 种植物,这可以很好地对我国广泛存在的间作套种和不同熟制区的轮作制度进行 模拟。

5.4 对 BMP 的模拟

模型中对 BMP 的模拟大多数是可以基于物理过程而不是简单的消减系数进行设置,并包含了对多种常见的结构性、非结构性和管理性 BMP 的模拟功能。文献中应用 APEX 模型对多种 BMP 的效果进行评价<sup>[73-76]</sup>。

5.5 对水稻田的模拟

APEX 模型的耕作措施模拟中包含了对水稻田蓄水和排水等措施的模拟,用户可以依据实际的田块管理 实际按照日期或者积温对水稻田的蓄水和排水进行设置,用于模拟水稻的生长。

除了上述模型机理方面的优势, APEX 模型的跨平台运行(Windows 和 Linux 操作系统平台)、计算效率高、容易扩展等特点<sup>[77]</sup>也为该模型适用于大面积的模拟提供了便利。目前,由中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室主导开发的生态模型云平台(http://159.226.240.209/rceesecomodelcloud. html),已经将 APEX 模型的构建和运行包含进来。该平台共包含运行 APEX 模型的线上和线下两个版本,线上版本包含了中国内陆地区构建模型所需的土壤、土地利用、DEM 和气象等数据库,用户可以直接通过网页 浏览器进行模型的构建和结果预览。线下版本则为用户定制模型构建提供了更多的选项。通过该平台,用户可以快速的进行模型构建和运行,大大简化了模型构建的学习时间,为后续的模型应用、机理改进和进一步开发提供了很好的基础。

#### 6 APEX 模型需要改进的方面

正如第3部分所说,当前我国面源污染模型相关的研究还存在诸多问题,APEX 模型虽然有很好的基础, 但是仍然有很多方面需要继续进行深入研究。下面针对我国面源污染模型的需要对 APEX 模型都要改进的 方面进行阐述。

6.1 理论验证和扩展

无论是 APEX,还是其他基于国外条件开发的模型,其理论基础在中国都存在一定的"水土不服"。这首 先体现在作为模型中面源污染发生主要驱动力的水文过程的适用性。目前常用水文模型中关于径流产生的 模拟主要是通过美国农业部土壤保持服务中心(现自然资源保护服务中心)开发的径流曲线法(Curve Number Method)和 Green-Ampt 方法。径流曲线数方法主要描述蓄满产流机制。Green-Ampt 方法则是物理过程模型, 所模拟的产流机制由土壤入渗速率决定。在应用过程中,由于各地土壤和地理条件的差别,对于两种方法所 依赖的主要参数和方程的形式可能存在很大的不确定性<sup>[78]</sup>。目前大家主要是通过使用一些自动参数校验工 具进行参数校正和验证的方式来确定模型的适用性。这种方式所确定的参数不一定符合研究区域的实际情 况,使得模型模拟的结果虽然跟观测值在统计值和线图上拟合较好,但是实际的水文循环组分的构成、氮循环 过程等有可能并不符合实际情况。

因此,模型研究要结合土壤水文的理论和实验研究,依据我国各个地方实际的土壤和土地利用状况下决定的降雨和径流之间的关系,从机理上对模型采用的公式进行验证,而不仅仅是参数校验。除了地表径流的计算之外,其他的相关理论包括土壤侵蚀预测公式、碳氮磷循环相关的公式、以及中国特有的一些 BMP 的设置和效果,都应当根据特定过程依据数据和相关领域专家的意见(又称"软数据")对模拟结果进行校正和验证。在现有的文献当中,无论是通过自研还是对 SWAT 等基于国外的模型,已有一些文献开始对模型机理开始关注。

对于 APEX 来讲,也面临同样的问题。APEX 的一个优势是在模型设计中,对于不同的过程通常都提供 较多的选项,比如对潜在蒸散量的模拟就包含了常见 5 个公式,为模型理论的验证提供了很多的便利。在后 续的研究中,我们将针对我国面源污染的特征,寻找土壤、水文、养分循环等方面的同行合作,对 APEX 模型的 理论基础进行全面的验证和改进,使其更加适合对我国面源污染的模拟。

6.2 模型应用推广

一个模型的成功推广和应用取决于四个方面,模型的理论合理性、模拟结果的准确性、模型参数敏感性和 模型的操作易用性。就 APEX 模型来讲,其理论方面相比其他模型具有一定优势,主要是由于 Jimmy R. Williams 博士一直专门从事 EPIC 和 APEX 模型的开发工作,为模型的理论框架和更新做出了大量的努力。 在模拟结果准确性方面,同 SWAT 模型相比,APEX 模型虽然在全世界的验证方面有些不足,但是在美国也已 经有非常多的验证,对模型的准确性有足够的支撑。模型参数的敏感性主要是指模型应该包含面源污染各个 过程相对全面的影响因素,而这些影响因素是在相应公式中的参数中体现出来。从参数敏感性角度来讲,模 型模拟结果对同影响较大的因素相关的参数敏感性大,而对同影响较小的因素相关的参数敏感性小。APEX 模型中包含超过 150 个参数,不同过程敏感性较大的参数在 20 个左右,其余的参数敏感性相对较小。

操作易用性则要求模型的模型支持文档、用户界面、数据要求和准备、模型结果处理等都要便于用户理解和应用模型。在这一点上,目前 APEX 显得相对不足。尽管已经翻译出版了 APEX 模型用户手册和理论手册<sup>[79-80]</sup>,但用户手册和理论手册的编写易读性不足。用户界面目前主要包含 ArcAPEX<sup>[56]</sup>,但到 ArcGIS10.3 版本之后不再更新,并且在软件安装和运行过程当中,经常出现问题,也缺少相应的技术团队来支持,在近年

来 ArcGIS 不断更新的情况下,非常不利于 APEX 模型的推广应用。在数据要求和准备方面,通过多年的积累,我国的面源污染相关的研究人员已经有一定的数据量来支持特定区域的模型构建和验证<sup>[81-84]</sup>,然而,进行全国的模型模拟和验证仍然存在一定的困难。在网络版模型开发方面,目前我们已经在生态模型云平台上 开发了基于 python 语言的 pyapex 软件,软件的用户界面也在不断完善,并且提供了包含在中国内陆地区构建 模型所需要的完整数据库。然而,对于模型的验证,仍需要大量的工作。

#### 7 结论

我国的面源污染问题仍然很严重,这是在保证我国粮食和生态安全进程中必须要解决的关键问题之一。 然而,由于我国的社会、经济和自然环境的多样性和复杂性,决定了面源污染问题的解决是一个需要考虑多种 因素和多个过程的系统工程,对该问题的研究也离不开面源污染模型的开发与应用。目前,我国面源污染模 型的研究以借鉴和应用国外的模型为主,同时也包含一些自主开发的模型,虽然开展很多的工作,但也存在模 型验证不足、模型对我国面源污染特征针对性不强和与机理研究结合不够深入等问题。APEX 模型作为一个 正在被广泛应用的模型,其灵活的模拟单元设置、针对面源污染的多元性和种植制度的复杂性的模拟能力,使 得该模型在我国面源污染问题研究中具有较好的应用和发展前景。本文通过对 APEX 模型的模块和应用验 证历史的详细分析,提出了为了提高该模型在我国的适用性所需要进行机理改进和应用推广需求,以期能够 推动我国面源污染模型的发展。

#### 参考文献(References):

- [1] 马国霞, 於方, 曹东, 牛坤玉. 中国农业面源污染物排放量计算及中长期预测. 环境科学学报, 2012, 32(2): 489-497.
- [2] Yu C Q, Huang X, Chen H, Godfray H C J, Wright J S, Hall J W, Gong P, Ni S Q, Qiao S C, Huang G R, Xiao Y C, Zhang J, Feng Z, Ju X T, Ciais P, Stenseth N C, Hessen D O, Sun Z L, Yu L, Cai W J, Fu H H, Huang X M, Zhang C, Liu H B, Taylor J. Managing nitrogen to restore water quality in China. Nature, 2019, 567(7749): 516-520.
- [3] 韩馥冰. 我国化肥施用研究综述. 乡村科技, 2020, (14): 106-108.
- [4] 吴永红, 胡正义, 杨林章. 农业面源污染控制工程的"减源-拦截-修复"(3R)理论与实践. 农业工程学报, 2011, 27(5): 1-6.
- [5] 夏立忠,杨林章,吴春加,吴玉芳.太湖地区典型小城镇降雨径流 NP 负荷空间分布的研究.农业环境科学学报,2003,22(3):267-270.
- [6] 闵继胜, 孔祥智. 我国农业面源污染问题的研究进展. 华中农业大学学报(社会科学版), 2016, (2): 59-66, 136-136.
- [7] 王一格,王海燕,郑永林,孙向阳.农业面源污染研究方法与控制技术研究进展.中国农业资源与区划,2021,42(1):25-33.
- [8] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, Williams J R. Large area hydrologic modeling and assessment Part I: model development. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [9] Wang X, Williams J R, Gassman P W, Baffaut C, Izaurralde R C, Jeong J, Kiniry J R. EPIC and APEX: model use, calibration, and validation. Transactions of the ASABE, 2012, 55(4): 1447-1462.
- [10] 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 modelling approach. Journal of Hydrology, 1996, 183(3/4): 323-349.
- [11] Momm H G, Bingner R L, Wells R R, Wilcox D. AGNPS GIS-Based tool for watershed-scale identification and mapping of cropland potential ephemeral gullies. Applied Engineering in Agriculture, 2012, 28(1): 17-29.
- [12] Jiang L, Chen Y, Wang H, Urban flood simulation based on the SWMM model. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2015, 368: 186-191.
- [13] Shen Z Y, Liao Q, Hong Q, Gong Y W. An overview of research on agricultural non-point source pollution modelling in China. Separation and Purification Technology, 2012, 84: 104-111.
- [14] 王萌,周丽丽,耿润哲.农业面源污染治理的技术与政策研究进展.环境与可持续发展, 2020, 45(1): 98-103.
- [15] 尹黎明,王秀英,潘剑君. APEX 模型在淮河流域中上游的适宜性研究. 水土保持学报, 2008, 22(1): 199-202, 206-206.
- [16] Ongley E D, Zhang X L, Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source Pollution assessment in China. Environmental Pollution, 2010, 158(5): 1159-1168.
- [17] 毕雪, 王晓媛. 基于输出系数模型的洞庭湖流域面源污染分析. 人民长江, 2012, 43(11): 74-77.
- [18] 翟玥, 尚晓, 沈剑, 王欣泽. SWAT 模型在洱海流域面源污染评价中的应用.环境科学研究, 2012, 25(6): 666-671.

#### http://www.ecologica.cn

- [19] Hou X Y, Ying L L, Chang Y Y, Qian S S, Zhang Y. Modeling of non-point source nitrogen pollution from 1979 to 2008 in Jiaodong Peninsula, China. Hydrological Processes, 2014, 28(8): 3264-3275.
- [20] Ouyang W, Song K Y, Wang X L, Hao F H. Non-point source pollution dynamics under long-term agricultural development and relationship with landscape dynamics. Ecological Indicators, 2014, 45: 579-589.
- [21] Ouyang W, Huang H B, Hao F H, Shan Y S, Guo B B. Evaluating spatial interaction of soil property with non-point source pollution at watershed scale: the phosphorus indicator in Northeast China. Science of the Total Environment, 2012, 432; 412-421.
- [22] Ma G W, Wang S R. Temporal and spatial distribution changing characteristics of exogenous pollution load into Dianchi Lake, Southwest of China. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(5): 3781-3793.
- [23] Jiang S, Qiu S, Zhou J. Re-Examination of the relationship between agricultural economic growth and non-point source pollution in China: evidence from the threshold model of financial development. Water, 2020, 12(9): 2609.
- [24] Wang S R, Rao P Z, Yang D W, Tang L H. A combination model for quantifying non-point source pollution based on land use type in a typical urbanized area. Water, 2020, 12(3): 729.
- [25] Wang W Z, Chen L, Shen Z Y. Dynamic export coefficient model for evaluating the effects of environmental changes on non-point source pollution. Science of the Total Environment, 2020, 747: 141164.
- [26] 黄和平,王智鹏. 江西省农用地生态效率时空差异及影响因素分析——基于面源污染、碳排放双重视角. 长江流域资源与环境, 2020, 29 (2):412-423.
- [27] Li J K, Ma M H, Li Y J, Deng C N, Pan B Z. Evaluating hydrological and environmental effects for low-impact development of a sponge city. Polish Journal of Environmental Studies, 2020, 29(2): 1205-1218.
- [28] Zhang P, Yang Y C, Chen L, Xie H, Shen Z Y. Applying copulas to predict the multivariate reduction effect of best management practices. Journal of Environmental Management, 2020, 267: 110641.
- [29] Zhang Z, Huang P, Chen Z H, Li J M. Evaluation of distribution properties of non-point source pollution in a subtropical monsoon watershed by a hydrological model with a modified runoff module. Water, 2019, 11(5): 993.
- [30] Chen L, Li S, Zhong Y C, Shen Z Y. Improvement of model evaluation by incorporating prediction and measurement uncertainty. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(8): 4145-4154.
- [31] Shen Z Y, Hong Q, Yu H, Niu J F. Parameter uncertainty analysis of non-point source pollution from different land use types. Science of the Total Environment, 2010, 408(8): 1971-1978.
- [32] Zhang P P, Liu R M, Bao Y M, Wang J W, Yu W W, Shen Z Y. Uncertainty of SWAT model at different DEM resolutions in a large mountainous watershed. Water Research, 2014, 53: 132-144.
- [33] Chen L, Chen S B, Li S, Shen Z Y. Temporal and spatial scaling effects of parameter sensitivity in relation to non-point source pollution simulation. Journal of Hydrology, 2019, 571: 36-49.
- [34] Chen L, Xu J J, Wang G B, Shen Z Y. Comparison of the multiple imputation approaches for imputing rainfall data series and their applications to watershed models. Journal of Hydrology, 2019, 572: 449-460.
- [35] Chen L, Sun C, Wang G B, Xie H, Shen Z Y. Modeling multi-event non-point source pollution in a data-scarce catchment using ANN and entropy analysis. Entropy, 2017, 19(6): 265.
- [36] Chen L, Xu J J, Wang G B, Liu H B, Zhai L M, Li S, Sun C, Shen Z Y. Influence of rainfall data scarcity on non-point source pollution prediction: Implications for physically based models. Journal of Hydrology, 2018, 562; 1-16.
- [37] Dai C, Qin X S, Tan Q, Guo H C. Optimizing best management practices for nutrient pollution control in a lake watershed under uncertainty. Ecological Indicators, 2018, 92: 288-300.
- [38] Ba W L, Du P F, Liu T, Bao A M, Chen X, Liu J, Qin C X. Impacts of climate change and agricultural activities on water quality in the Lower Kaidu River Basin, China. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(1): 164-176.
- [39] Wu L, Long T Y, Liu X, Guo J S. Impacts of climate and land-use changes on the migration of non-point source nitrogen and phosphorus during rainfall-runoff in the Jialing River Watershed, China. Journal of Hydrology, 2012, 475: 26-41.
- [40] Shen Z Y, Zhong Y C, Huang Q, Chen L. Identifying non-point source priority management areas in watersheds with multiple functional zones. Water Research, 2015, 68: 563-571.
- [41] Li C H, Zheng X K, Zhao F, Wang X, Cai Y P, Zhang N. Effects of urban non-point source pollution from Baoding city on Baiyangdian lake, China. Water, 2017, 9(4): 249.
- [42] Li W H, Cheng X J, Zheng Y, Lai C G, Sample D J, Zhu D T, Wang Z L. Response of non-point source pollution to landscape pattern: case study in mountain-rural region, China. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(13): 16602-16615.
- [43] Li J K, Li H E, Li Y J. Evaluation of AnnAGNPS and its applications in a semi-arid and semi-humid watershed in Northwest China. International

Journal of Environment and Pollution, 2012, 49(1/2): 62-88.

- [44] Xu K, Wang Y P, Su H, Yang J X, Li L L, Liu C. Effect of land-use changes on nonpoint source pollution in the Xizhi River watershed, Guangdong, China. Hydrological Processes, 2013, 27(18): 2557-2566.
- [45] Li T H, Bai F J, Han P, Zhang Y Y. Non-point source pollutant load variation in rapid urbanization areas by remote sensing, Gis and the L-THIA model: A case in Bao'an District, Shenzhen, China. Environmental Management, 2016, 58(5): 873-888.
- [46] Lin C, Wu Z P, Ma R H, Su Z H. Detection of sensitive soil properties related to non-point phosphorus pollution by integrated models of SEDD and PLOAD. Ecological Indicators, 2016, 60: 483-494.
- [47] Xiong J F, Lin C, Min M, Ma R H, Wu Z P, Jia J J. Spatio-temporal pattern evolution of non-point source phosphorus loads in chaohu lake basin (Anhui Province, China) under different land use patterns. Applied Ecology and Environmental Research, 2018, 16(5): 6219-6238.
- [48] Du X Z, Su J J, Li X Y, Zhang W S. Modeling and evaluating of non-point source pollution in a semi-arid watershed: implications for watershed management. CLEAN-Soil, Air, Water, 2016, 44(3): 247-255.
- [49] Liu J, Fu B, Zhang C H, Wang Y K. Modelling spatial variation in the treatment costs of non-point source pollution in mountainous regions of southwest China. Journal of Mountain Science, 2019, 16(8): 1901-1912.
- [50] Bai X Y, Shen W, Wang P, Chen X H, He Y H. Response of non-point source pollution loads to land use change under different precipitation scenarios from a future perspective. Water Resources Management, 2020, 34(13): 3987-4002.
- [51] Liu Y, Bi J, Lv J S, Ma Z W, Wang C. Spatial multi-scale relationships of ecosystem services: A case study using a geostatistical methodology. Scientific Reports, 2017, 7(1): 9486.
- [52] Ding X W, Liu L.Long-term effects of anthropogenic factors on nonpoint source pollution in the upper reaches of the yangtze river. Sustainability, 2019, 11(8): 2246.
- [53] Zhuang Y H, Zhang L, Li S S, Liu H B, Zhai L M, Zhou F, Ye Y S, Ruan S H, Wen W J. Effects and potential of water-saving irrigation for rice production in China. Agricultural Water Management, 2019, 217: 374-382.
- [54] Tian F, Huang J C, Cui Z, Gao J F, Wang X S, Wang X J. Integrating multi indices for identifying priority management areas in lowland to control lake eutrophication: A case study in lake Gehu, China. Ecological Indicators, 2020, 112: 106103.
- [55] Gassman P W, Williams J R, Wang X Y, Saleh A, Osei E, Hauck L M, Izaurralde R C, Flowers J D. The agricultural policy environmental eXtender (APEX) model: an emerging tool for landscape and watershed environmental analyses. Transactions of the ASABE, 2020, 53(3): 711-740.
- [56] Tuppad P, Winchell M, Wang X, Srinivasan R, Williams J. ARCAPEX: Arcgis interface for agricultural policy environmental extender (APEX) Hydrology/water quality model. International Agricultural Engineering Journal, 2009, 18(1/2): 59-71.
- [57] Feng Q Y, Engel B A, Flanagan D C, Huang C H, Yen H, Yang L. Design and development of a web-based interface for the Agricultural Policy Environmental eXtender (APEX) model. Environmental Modelling & Software, 2019, 111; 368-374.
- [58] Feng Q Y, Flanagan D C, Engel B A, Yang L, Chen L D. Geoapexol, a web gis interface for the agricultural policy environmental extender (Apex) model enabling both field and small watershed simulation. Environmental Modelling & Software, 2020, 123: 104569.
- [59] Hong E M, Park Y, Muirhead R, Jeong J, Pachepsky Y A. Development and evaluation of the bacterial fate and transport module for the Agricultural Policy/Environmental eXtender (APEX) model. Science of The Total Environment, 2018, 615: 47-58.
- [60] Tadesse H K, Moriasi D N, Gowda P H, Marek G, Steiner J L, Brauer D, Talebizadeh M, Nelson A, Starks P. Evaluating evapotranspiration estimation methods in APEX model for dryland cropping systems in a semi-arid region. Agricultural Water Management, 2018, 206: 217-228.
- [61] Talebizadeh M, Moriasi D, Gowda P, Steiner J L, Tadesse H K, Nelson A M, Starks P. Simultaneous calibration of evapotranspiration and crop yield in agronomic system modeling using the APEX model. Agricultural Water Management, 2018, 208: 299-306.
- [62] Wang X Y, Yen H, Liu Q Y, Liu J G. An auto-calibration tool for the agricultural policy environmental eXtender (APEX) model. Transactions of the ASABE, 2014, 57(4): 1087-1098.
- [63] Wang X, Potter S R, Williams J R, Atwood J D, Pitts T. Sensitivity analysis of APEX for national assessment. Transactions of the ASABE, 2006, 49(3): 679-688.
- [64] Wang X, Saleh A, McBroom M W, Williams J R, Yin L. Test of APEX for nine forested watersheds in east texas. Journal of Environmental Quality, 2007, 36(4): 983-995.
- [65] Williams J R, Harman W L, Magre M, Kizil U, Lindley J A, Padmanabhan G, Wang E. APEX feedlot water quality simulation. Transactions of the ASABE, 2006, 49(1): 61-73.
- [66] Wang X, Gassman P W, Williams J R, Potter S, Kemanian A R. Modeling the impacts of soil management practices on runoff, sediment yield, maize productivity, and soil organic carbon using APEX. Soil and Tillage Research, 2008, 101(1/2): 78-88.
- [67] Zhang B B, Feng G, Read J J, Kong X B, Ouyang Y, Adeli A, Jenkins J N. Simulating soybean productivity under rainfed conditions for major

soil types using APEX model in East Central Mississippi. Agricultural Water Management, 2016, 177: 379-391.

- [68] Timlin D, Chun J A, Meisinger J, Kang K, Fleisher D, Staver K, Doherty C, Russ A. Evaluation of the agricultural policy environmental extender (APEX) for the Chesapeake Bay watershed. Agricultural Water Management, 2019, 221: 477-485.
- [69] Kamruzzaman M, Hwang S, Choi S K, Cho J, Song I, Jeong H, Song J H, Jang T, Yoo S H. Prediction of the effects of management practices on discharge and mineral nitrogen yield from paddy fields under future climate using APEX-paddy model. Agricultural Water Management, 2020, 241: 106345.
- [70] Carena L, Vione D. Modelling the photochemistry of imazethapyr in rice paddy water. Science of the Total Environment, 2018, 644: 1391-1398.
- [71] Azevedo J C, Williams J R, Messina M G, Fisher R F. Impacts of the sustainable forestry initiative landscape level measures on hydrological processes. Water Resources Management, 2005, 19(2): 95-110.
- [72] Gassman P W, Osei E, Saleh A, Rodecap J, Norvell S, Williams J. Alternative practices for sediment and nutrient loss control on livestock farms in northeast Iowa. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 117(2/3): 135-144.
- [73] Cavero J, Barros R, Sellam F, Topcu S, Isidoro D, Hartani T, Lounis A, Ibrikci H, Cetin M, Williams J R, Aragüés R. APEX simulation of best irrigation and N management strategies for off-site N pollution control in three Mediterranean irrigated watersheds. Agricultural Water Management, 2012, 103: 88-99.
- [74] Francesconi W, Smith D R, Flanagan D C, Huang C H, Wang X Y. Modeling conservation practices in APEX: from the field to the watershed. Journal of Great Lakes Research, 2015, 41(3): 760-769.
- [75] Prada A F, Chu M L, Guzman J A, Moriasi D N. Evaluating the impacts of agricultural land management practices on water resources: A probabilistic hydrologic modeling approach. Journal of Environmental Management, 2017, 193: 512-523.
- [76] Wang S, Williams J, Jones C A, Srinivasan R. Conservation Practice Modeling Guide for SWAT and APEX, 2011, Temple, TX.
- [77] Taylor R A J, Jeong J, White M, Arnold J G. Code modernization and modularization of APEX and SWAT watershed simulation models. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(3): 1-14.
- [78] Lian H S, Yen H, Huang J C, Feng Q Y, Qin L H, Bashir M A, Wu S X, Zhu A X, Luo J F, Di H J, Lei Q L, Liu H B. CN-China: Revised runoff curve number by using rainfall-runoff events data in China. Water Research, 2020, 177: 115767.
- [79] Steglich E M, Jeong J, Williams J R. APEX 模型用户指南. 雷秋良, 王秀英, 周脚根, 译. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [80] Williams J R, Izaurralde R C, Williams, C, Steglich E M. APEX 模型理论手册. 雷秋良, 秦丽欢, 闫铁柱, 译. 北京: 中国农业出版 社, 2020.
- [81] 孙军,林德根,李凤全,黄颖,陈剑舜,白雪燕.不同空间分辨率数据组合对 APEX 模型模拟的影响——以金华江流域为例.浙江师范大学学报(自然科学版),2020,43(3):336-342.
- [82] Zhang B B, Feng G, Ahuja L R, Kong X B, Ouyang Y, Adeli A, Jenkins J N. Soybean crop-water production functions in a humid region across years and soils determined with APEX model. Agricultural Water Management, 2018, 204: 180-191.
- [83] 刘清影, 刘俊国, 王秀英. APEX 模型在黄旗海流域的适用性研究. 干旱区资源与环境. 2014, 28(9): 185-190.
- [84] 尹黎明, 潘剑君, 王秀英. APEX 模型在淮河中上游坡面尺度的适宜性研究. 中国水土保持科学, 2012, 10(2): 1-7.