

基于文献计量学的 EPIC 模型应用综述

翟钰钰^{1,2}, 方海燕^{1,2}

(1.中国科学院 地理科学与资源研究所陆地水循环与地表过程
重点实验室, 北京 100101; 2.中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: [目的] 检索 1991—2021 年 EPIC 模型的应用情况, 进行文献计量和聚类分析, 为 EPIC 模型未来的应用和发展指出方向。[方法] 通过检索 Web of Science 核心数据库, 基于检索到的 1991—2021 年与 EPIC 模型相关的 261 篇论文和 R 软件包 bibliometrix 文献计量和聚类分析法, 分析了 EPIC 模型的研究热点和历史发展趋势。[结果] 1991—2021 年, EPIC 模型应用年发文量呈增加趋势, 已有研究侧重于水文水资源与气候变化、土壤侵蚀与养分流失、农业干旱和作物生长等 4 个方面。该模型模拟精度高, 能够很好地评价和预测过去、现在和未来的水、土、土壤养分流失和作物产量, 但模型也存在参数多, 输入数据制备难的缺点。[结论] EPIC 模型可应用于多个研究领域, 与其他模型及深度学习等方法的耦合, 为深入开展“双碳”和水土流失研究、作物生产及对气候变化的响应模拟和预测等工作提供支撑。

关键词: 文献计量; EPIC; 土壤侵蚀; bibliometrix

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0263-09

中图分类号: K903

文献参数: 翟钰钰, 方海燕. 基于文献计量学的 EPIC 模型应用综述[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 263-271. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2023.01.030; Zhai Yuyu, Fang Haiyan. A review of EPIC model applications based on bibliometrix analysis [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 263-271.

A Review of EPIC Model Applications Based on Bibliometrix Analysis

Zhai Yuyu^{1,2}, Fang Haiyan^{1,2}

(1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Beijing 100101, China;
2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] Previous studies regarding the use of the erosion-productivity impact calculator (EPIC) model from 1991 to 2021 were retrieved in order to conduct bibliometrics and cluster analysis so that the direction for the future application and development of the EPIC model could be determined. [Methods] The R-bibliometrix tool was used to analyze literature related to the EPIC model in the Web of Science Core Collection Database, and 261 papers were ultimately selected. The research hotspot and historical development trend of EPIC model were analyzed. [Results] During 1991—2021, the applications of the EPIC model were mainly focused on four aspects: water resources, crop growth, soil erosion and organic matter loss, and agricultural drought. The EPIC model had high simulation accuracy and was able to well evaluate water erosion, soil nutrient loss, and crop yield in the past, present, and future. However, disadvantages included too many parameters and extensive input data requirements. [Conclusion] The EPIC model has many modules and thus has potential to be applied across broadly different research fields in the future. It also has the potential to be coupled with other models and deep learning methods in the future in order to carry out in-depth simulations regarding “double carbon”, soil erosion, crop production, and climate change responses.

Keywords: bibliometrics; erosion-productivity impact calculator (EPIC); soil erosion; bibliometrix

收稿日期: 2022-05-24

修回日期: 2022-06-25

资助项目: 国家重点研发课题“黑土地耕地质量立体监测认知理论与指标体系”(2021YFD1500101); 国家自然科学基金面上基金项目“黑土区不同坡形坡耕地侵蚀及其对降雨和水保措施的响应”(41977066); 国家自然科学基金面上项目“东北黑土区农田道路网对小流域侵蚀产沙的影响”(42277334)

第一作者: 翟钰钰(1999—), 女(汉族), 山东省聊城市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。Email: zhaiyuyu3421@igsnr.ac.cn。

通信作者: 方海燕(1977—), 男(汉族), 山东省济宁市人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。Email: fanghy@igsnr.ac.cn。

EPIC (environmental policy-integrated climate) 是一个基于物理过程的定量评价“气候—土壤—作物—管理”系统的综合动力学模型^[1]。它是 20 世纪 80 年代初期由美国德克萨斯农工大学黑土地研究中心和美国农业部草地、土壤和水分研究所共同研究开发的适用于多种土壤、气候和作物类型的模型。该模型常用于评估管理策略变化对土壤侵蚀和土地生产力的影响^[2-4]。最初的 EPIC 版本称为侵蚀—生产力影响计算器 (erosion-productivity impact calculator), 之后 EPIC 逐步完善, 在增加了与水质和大气 CO₂ 变化有关的模拟功能后, 于 1996 年更名为环境政策综合气候模型 (the environmental policy integrated climate), 现在已经更新维护到 EPIC v.110.2。在官网 (<https://epicapex.tamu.edu/software/>) 上公开了 FORTRAN 源码和 EPIC Editor (基于 Microsoft Excel 构建的), 方便用户修改和使用自己的数据运行模型模拟。此外, 与 EPIC 交互的软件程序 i_EPIC 具有内置的图形功能, 可以通过 Microsoft Access 数据库格式导入模型所需的操作数据控制运行和报告, 并提供了一个创建输入和输出表的界面。该模型输入数据包括土壤、气候和农业管理措施及耕作方式和实施肥料等^[5]。

EPIC 模型包含 11 个模块, 包括气候、水文、侵蚀、养分、农药、土壤温度、作物生长、栽培、作物环境、经济和碳循环模块^[6], 可用于水文过程、气候变化、土壤侵蚀、养分运移、植物生长、土壤温度、耕作措施和经济管理等的模拟与预测工作。范兰等^[7]简述了 EPIC 模型的主要结构和功能并总结了主要应用领域及在中国的应用情况。Wang 等^[8]结合系统评价和 meta 分析, 综述了 EPIC 作物生长模型的应用, 包括改善作物生长模型精度, 探究气候变化影响和缓解农业干旱, 并讨论了农业生产如何适应气候变化。目前, 该模型在全世界得到了广泛的推广, 其应用包括运用 EPIC 进行模型模拟、计算土壤可蚀性及与其他模型耦合开展相关研究等。Kar 等^[9]评估了 13 种土

壤水力侵蚀模型, 认为 RUSLE (revised universal soil loss equation)、WEPP (water erosion project prediction)、SWAT (soil and water assessment tools) 和 EPIC 等模型适用于亚洲地区, 且在世界范围内具有良好的适用性。

因此, 应用 EPIC 模型可开展的研究广泛, 它在全世界不同土壤和气候区都得到了不同程度的应用。然而, 采用该模型开展的研究主要集中在哪些方面, 取得了哪些成果, 未来的研究趋势是什么等还不清楚, 在一定程度上限制了该模型的进一步发展与应用。因此, 非常有必要对该模型在全世界的应用情况进行系统的综述。文献计量学可以快速了解领域内的研究动态、热点及发展脉络。此外, Aria 和 Cuccurullo^[10]还提出了一个开源的 R 软件包 bibliometrix, 基于因子分析进行文本挖掘, 可以进行文献计量统计分析, 并可对未来研究方向进行预测等^[11], 这为该模型的应用与发展提供了很好的技术手段。

本文基于 Web of Science 核心数据库, 采用关键词“EPIC”“Erosion-Productivity Impact Calculator”和“Environmental Policy Integrated Climate”, 检索了 30 a 来 (1991—2021 年) EPIC 模型的应用情况, 并基于 R 软件包 bibliometrix 进行文献计量和聚类分析, 进而综述了 EPIC 模型的应用进展, 并指出了 EPIC 模型未来的应用和发展方向。

1 文献计量分析结果

在 1991—2021 年, 基于以上关键词检索到的论文有 261 篇, 其中正式发表的期刊论文 239 篇, 即将发表的论文 13 篇, 书中章节 1 篇, 数据文章 7 篇, 会议论文 1 篇。研究时段有 1 263 位作者在 118 个期刊上发表了 239 篇论文, 引用的参考文献达 8 484 篇; 平均每年发表的论文有 13.2 篇, 论文年均引用量为 24.33, 平均每年每篇论文有 2.08 的引用量。独立完成论文的作者有 7 位, 每篇论文平均有 4.84 个共同作者完成, 协作指数为 3.06 (表 1)。

表 1 应用 EPIC 模型发表的相关论文统计信息

Table 1 Information of papers related to the application of the EPIC model

发表论文数量 (Articles)	239
出现的作者数 (Author appearances)	1263
独立完成论文的作者数 (Authors of single-authored documents)	7
所发表期刊的数量 [Sources (journals, books, etc.)]	118
年均发表数 (Average years from publication)	13.2
年均引用量 (Average citations per documents)	24.33
年均每年每篇论文引用量 (Average citations per year per doc)	2.078
参考文献 (References)	8484
平均每篇论文中的作者数 (Co-authors per documents)	4.84
协作指数 (Collaboration index)	3.06

1991—2021 年,EPIC 模型受到了不少学者的关注,年发文量整体上呈增加趋势,其中 1998 年、2017 年、2018 年、2021 年论文发表数较多(图 1)。应用 EPIC 模型发表论文前 10 位的国家有美国、中国、澳大利亚、加拿大、德国、意大利、日本、瑞士、法国和韩国等(图 2a)。与其他前 4 位国家相比,近年来中国采用该模型开展的工作越来越多(图 2b)。

然而,国内外应用 EPIC 模型发表相关论文数量前 10 位的作者所在机构多分布在国外,其中美国居多,中国作者仅有一人,这表明 EPIC 模型在中国的应用还不够深入,还有十分广阔的应用前景(图 3)。

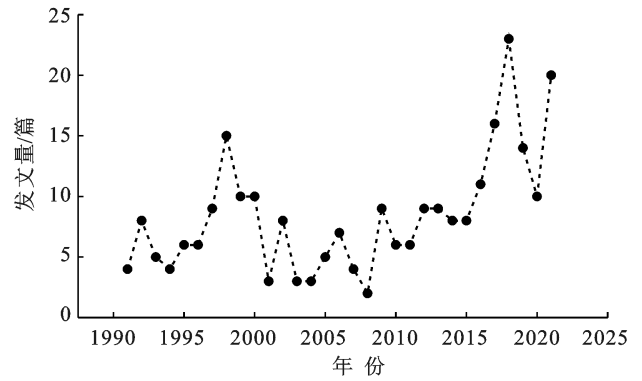


图 1 1991—2021 年应用 EPIC 模型发表的论文情况

Fig.1 The published a pplication of EPIC model during 1991—2021

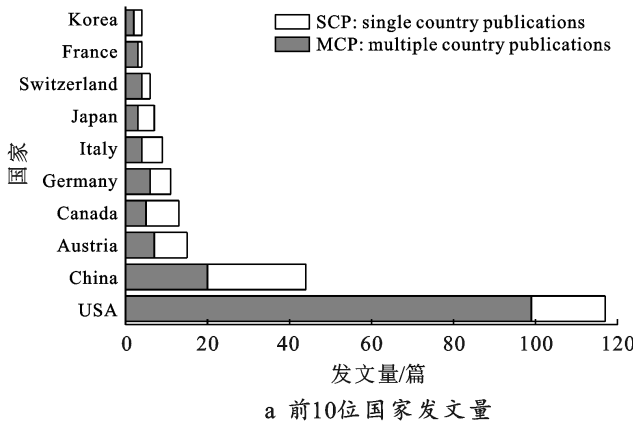


图 2 应用 EPIC 模型发表论文前 10 位的国家(a)以及应用该模型发表论文前 5 位国家的发文量(b)

Fig.2 Countries in the top 10 for publications applying the EPIC model (a), and variations of published papers by the top 5 countries applying the EPIC model in the last 30 years (b)

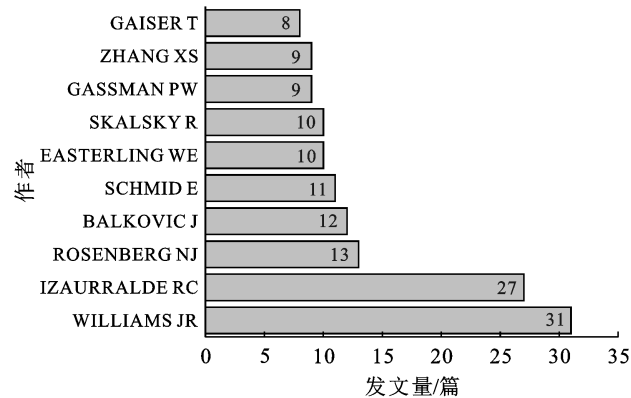
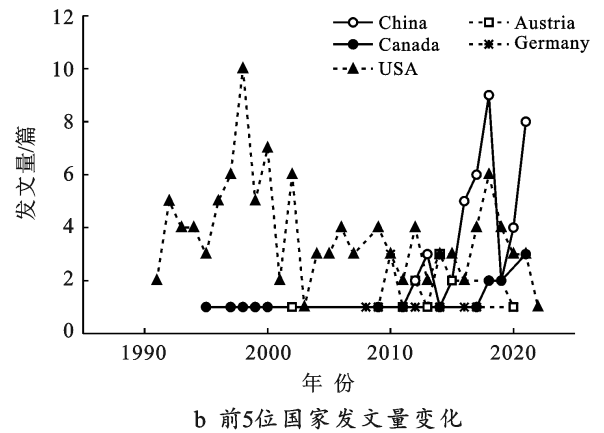


图 3 应用 EPIC 模型发表论文量前 10 位的作者

Fig.3 Authors of the top 10 publications using the EPIC model

应用 EPIC 模型发表论文数量前 10 位的期刊中,在 *Agricultural Systems* 上发表的论文最多为 17 篇(表 2),其次为 *Agricultural and Forest Meteorology* 和 *Ecological Modelling* 期刊,在其上发表的论文分别有 15 篇和 13 篇。

表 2 应用 EPIC 相关论文投稿前 10 位的期刊
Table 2 List of top 10 journals for submission of papers related to applied EPIC model

期刊名称	发文量/篇
<i>Agricultural Systems</i>	17
<i>Agricultural and Forest Meteorology</i>	15
<i>Ecological Modelling</i>	13
<i>Agriculture Ecosystems & Environment</i>	8
<i>Climatic Change</i>	8
<i>Transactions of the Asae</i>	8
<i>Canadian Journal of Soil Science</i>	6
<i>Journal of Soil and Water Conservation</i>	6
<i>Science of the Total Environment</i>	6
<i>Agricultural Water Management</i>	5

应用 EPIC 模型开展研究的前 10 位高被引论文内容涉及了作物生长模拟、气候变化及碳循环等(表 3)。其中直接引文中年均被引篇次排名第一的是 2006 年发表在 *Ecological Modelling* 期刊上的论文,该文介绍了基于 Century 模型机理开发的碳氮模型,

将土壤碳动态模拟与作物管理、耕作方法和 EPIC 模型的侵蚀过程联系起来,并与 EPIC 中的土壤湿度、温度、侵蚀、耕作、淋滤和迁移功能直接相互作用,建立了土壤质地对土壤碳稳定性的影响方程^[12]。该文

的高引表明,EPIC 模型对模拟土壤碳含量变化有较好的适用性,也表明全世界对土壤碳平衡的关注。该工作对于目前土壤侵蚀作用下的“双碳”研究将会有重要意义。

表 3 1991—2021 年有关 EPIC 模型的引文前 10 位论文情况
Table 3 Citations of top 10 on the EPIC model during 1991—2021

年份	文献	发表期刊	引用量	年均被引	创新点及应用
2006	Izaurrealde 等 ^[12]	<i>Ecological Modelling</i>	299	17.59	土壤碳平衡
2003	Doraiswamy 等 ^[13]	<i>Photogrammetric engineering remote sensing</i>	185	9.25	遥感影像反演与 EPIC 结合模拟春小麦产量
2012	Wang 等 ^[14]	<i>Transactions of the ASABE</i>	160	14.55	介绍了 EPIC 和 APEX 模型组成、校准参数
2003	Tan 和 Shibasaki ^[15]	<i>Ecological Modelling</i>	147	7.35	基于 GIS 的 EPIC 模拟全球范围内的作物生产力
2013	Bash 等 ^[16]	<i>Biogeosciences</i>	110	11	将 EPIC 与 CMAQ 耦合,评估氮通量
2000	Schneider 等 ^[17]	<i>Societal Adaptation to Climate Variability and Change(book)</i>	107	4.65	评估气候变化的敏感性
2000	Brown 等 ^[18]	<i>Agriculture, Ecosystems & Environment</i>	95	4.13	模拟不同二氧化碳浓度下的作物生产
1997	Robert 和 Norman ^[19]	<i>Agricultural and Forest Meteorology</i>	93	3.58	研究气候变化对农业生产的潜在影响
2013	Balković 等 ^[20]	<i>Agricultural Systems</i>	90	9	耦合 EPIC 和 ArcGIS 评估作物产量
2010	Zhang 等 ^[21]	<i>GCB Bioenergy</i>	90	6.92	生物燃料生物产量

通过对文献耦合、共引和共现数据进行归一化,以计算其相似度并进行共词分析(见图 4)。轴 1(Dim1)解释了总方差的 21.77%,轴 2(Dim2)解释了总方差的 11.8%,累计解释率达 33.57%,不同关键词节点间距离越小越相似,反之差异越大。关键词概念结构图被分为 4 类:①在聚类 B 中,主要有径流(flow)、率定(calibration)、灌溉(irrigation)、运移(transport)、系统(systems)等关键词,体现了 EPIC 模型在水文、养分运移方面的应用;②在聚类 A 中在水资源利用(water use)、大气二氧化碳(atmospheric carbon dioxide)、敏感

性(sensitivity)、响应(response)等关键词,体现了 EPIC 模型在水资源利用、气候变化方面的应用;③在聚类 C 中,沉积(sediment)、GIS、产量(yield)、温度(temperature)、蒸散发(evapotranspiration)、评估(simulation)、适应(adaption)等关键词,体现了 EPIC 模型在作物生长、农业干旱方面的应用;④在聚类 D 中,侵蚀(erosion)、土壤有机碳(soil organic carbon)、尺度(scale)、长序列(long term)等关键词,体现了 EPIC 模型在土壤侵蚀、有机物流失方面的应用。将所有关键词进一步生成聚类分析树形图(图 5)。

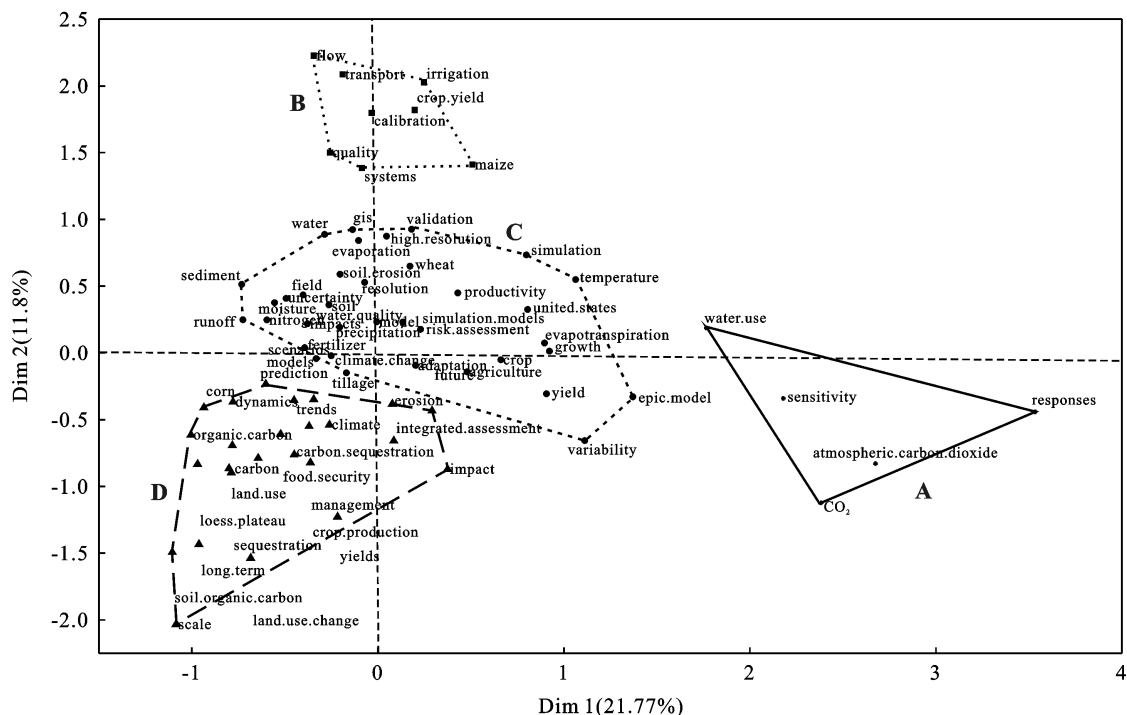


图 4 应用 EPIC 模型发表的相关论文关键词概念结构图

Fig.4 Conceptual structure of keywords for papers related to the application of the EPIC model

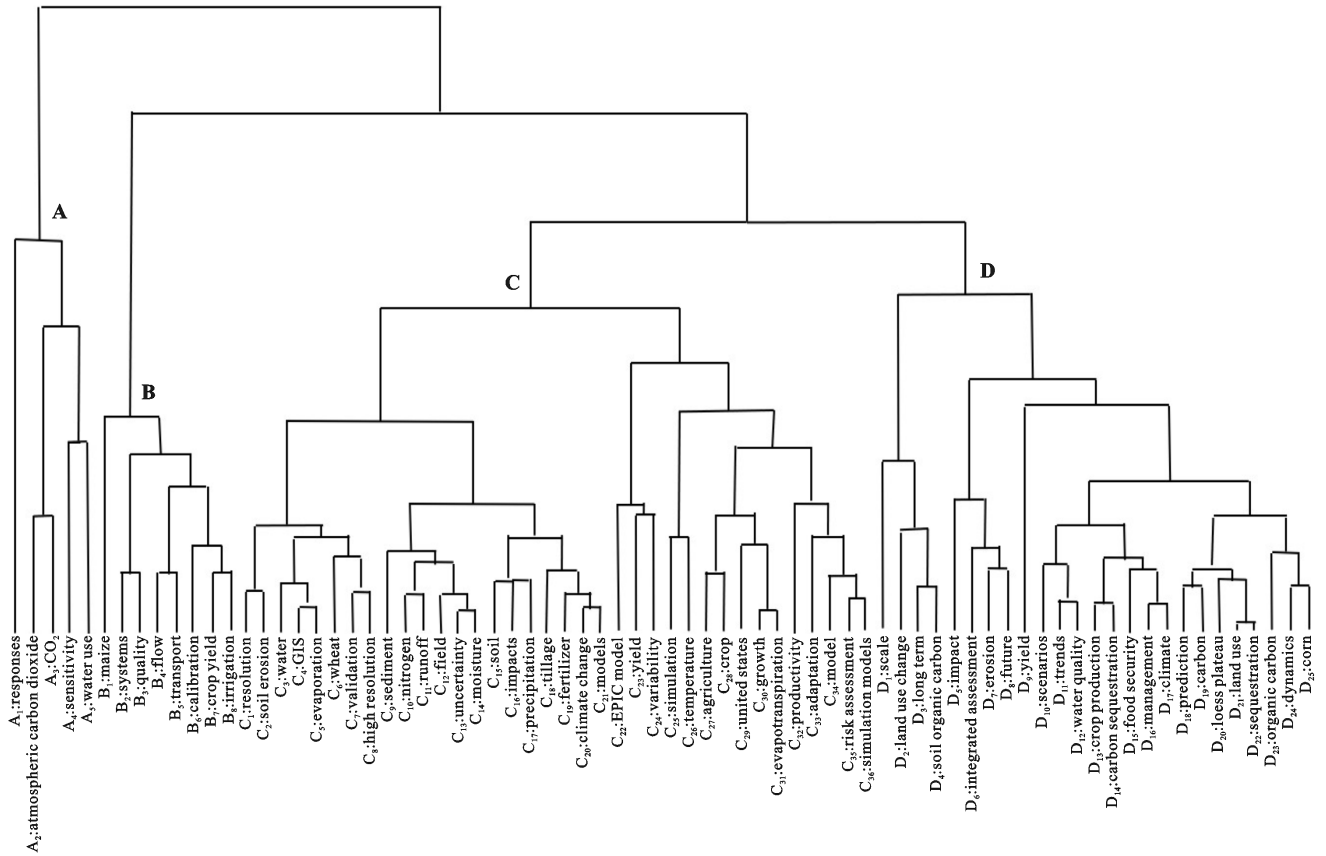


图 5 应用 EPIC 模型发表的相关论文关键词聚类图(图中聚类 A,B,C,D 标识 EPIC 模型的 4 个主要应用方面)

Fig.5 Clustering diagram of keyword clusters for papers published on the application of the EPIC model (Clusters A, B, C and D in the diagram identify the four main application aspects of the EPIC model)

图 4 和图 5 也进一步表明,EPIC 模型在地理学、农学、生态学以及水土保持学等领域都有应用,研究内容涉及水盐动态、有机碳、氮磷钾的淋溶、作物估产、土壤温度模拟、土壤侵蚀以及气候变化演变等(图 6)。

候、土壤有机碳、养分运移等方面具有广泛运用,可以用来评估和预测水资源、土壤侵蚀和养分流失、干旱评估及作物产量等,具体分为以下 4 个方面。

2.1 水资源及气候变化

EPIC 模型可以模拟小流域尺度上的水文平衡^[22],包括融雪、地表径流、入渗、土壤含水量、地下侧向流、地下水位动力学和蒸散发等。通过输入现有的降水、气温、太阳辐射、风速和相对湿度等参数,EPIC 天气发生器子程序可以生成未来的每日天气,进而可应用于气候变化相关研究。

基于 EPIC 模型的水文模块和作物模块,许多学者对水盐动态、养分迁移、地下水等物理过程进行了探讨。EPIC 模型集成了描述农田降水、径流、渗透、蒸散、吸收、胁迫等过程的数学方程,可用于农田水分动态管理与定量评价研究^[23],预测年蒸散发量、渗透量、模拟地下水水分平衡^[24],模拟作物影响下的土壤湿度^[25]及土壤水盐动态^[26],也可构建农田尺度土壤水盐动态与作物生长耦合模型等^[27]。朱焱等^[28]基于 EPIC 根系生长子模块与土壤氮素迁移转化模型 Nitrogen 2D 耦合,得到了作物生长条件下土壤水氮迁移转化过程。Wang 等^[29]评估了加拿大安大略省

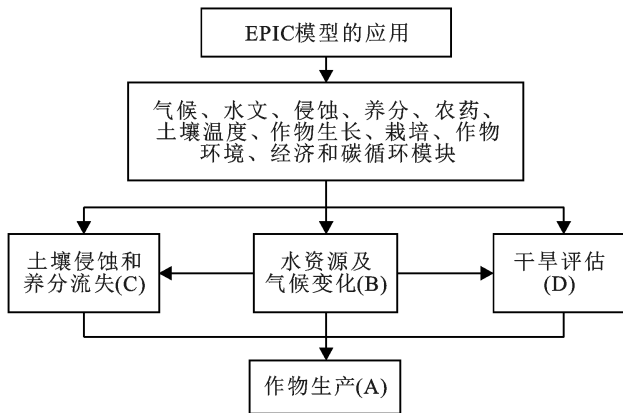


图 6 EPIC 模型主要应用关系

Fig.6 EPIC model main application relationship

2 EPIC 模型的主要应用

图 4 和图 5 表明,EPIC 模型在水资源、土壤、气

伊利湖盆地上玉米—大豆轮作下的作物产量、地表径流、灌溉排水和溶解活性磷损失,径流模拟精度可达 99%。也有研究^[30]利用 EPIC 模型评估了四川盆地不同氮肥处理下黑麦草的土壤水分变化,发现模型模拟的黑麦草产量、高度和叶面积指数和试验值具有良好的相关性。因此,该模型对于径流和水盐的模拟精度较高,但也有研究指出,EPIC 在评估水体富营养化风险时,发现 EPIC 模型的模拟精度较低^[31]。因此,EPIC 模型在进行水文环境模拟时,与水溶性元素迁移模型耦合还可以进一步提高模拟精度。

此外,EPIC 已被证实可以评估气候变化对作物生长和农业生态系统的影响,特别是常见的粮食作物和经济作物。有学者基于 EPIC 评估了中国北方不同灌溉类型和不同农业区域水分胁迫因子和温度胁迫因子对小麦产量波动的影响^[32]。还有学者基于 EPIC 模型探究了气候变化对中国东部 5 种主要作物(油菜籽、玉米、马铃薯、水稻和冬小麦)产量的潜在影响,识别了未来气候条件下的脆弱区域和新兴区域,发现气候变化比土壤性质的变化更能驱动产量的变化^[33]。此外,Zheng 等^[34]使用 EPIC 模型用于长期有机菜田试验,并且评估了气候变化下 7 种农业生态措施的性能。气候变化背景下水资源及相关研究,为该模型的进一步应用提供了很好的平台。

2.2 作物生产

作物产量是影响国计民生的大事。大量研究表明,EPIC 在作物估产上应用广泛且具有良好的适用性。许多学者应用或改良 EPIC 模型对常见作物(小麦、玉米、水稻等)产量进行了模拟评估,在不同尺度、不同研究区都取得了理想的效果。例如,Balković 等^[35]基于 EPIC 农业生态系统模型,量化了不同农业管理下的未来小麦产量,评估了气候变化下全球小麦产量,并且模拟产量与监测产量相关性高达 0.82; Carr 等^[36]基于 EPIC 模型,使用全球网格建模方法,模拟了全球 1980—2010 年期间水蚀对玉米和小麦产量的影响。Pumijumnong 和 Arunrat^[5]使用 EPIC 对泰国的水稻产量进行估计,并与泰国农业与合作部农业经济办公室的农业统计报告进行了比较,发现其预测精度高达 98%,验证了 i_EPIC 模型在农作物产量模拟上具有良好的性能。在中国,王宗明等^[37]修订了 EPIC 模型部分作物参数,验证了黄土塬区冬小麦和春玉米的作物生产潜力的适用性;范兰等^[38]也基于 EPIC 对华北平原冬小麦与夏玉米生长和产量进行了模拟。在作物估产方面,随着遥感技术的发展,可以快速获取长时间序列较高分辨率的作物产量数据。EPIC 模型有上百种作物生长的参数,因而其可

以模拟作物生长过程和创设作物生长情景进行未来预测,但也存在参数多、数据较难制备的缺点。在作物产量方面研究较多,EPIC 模型可以考虑土壤侵蚀,预计在侵蚀区会有更好的适用性。

2.3 土壤侵蚀和养分流失

EPIC 模型涵盖大量的土壤属性信息,包括土层深度、质地、容重和有机质含量等。因此,该模型已被广泛用于评估不同管理措施情境下土壤侵蚀、土壤生产力和土壤碳动态的影响研究。

采用情景模拟的方法,基于 EPIC 模型,对不同的耕作措施和农业管理措施下的耕地侵蚀和土壤养分流域开展了大量工作。例如,有学者基于 EPIC 模型预测了 4 种耕作管理措施下土壤有机碳的含量及变化^[39];或应用 EPIC 模型,量化了不同土壤和气候因素以及耕作施肥措施等对作物产量和有机碳变化的影响,可用于优化施肥管理^[40];还有学者基于 EPIC 模型评估了保护性耕作下多重作物轮作的水稻、大豆和木薯的雨养种植系统的有机碳封存特征^[41]。

EPIC 模型还可以耦合其他模型或算法、与 GIS 结合提高模型评估有机碳变化。Lychuk 等^[42]基于 EPIC 和新开发的生物炭算法,研究生物炭改型对热带玉米产量、土壤阳离子交换容量、pH 值、土壤容重和土壤有机碳动态的影响,评估了生物炭适应气候变化的潜力。Carr 等^[43]基于 EPIC 的全球栅格作物模型,分析了 1980—2010 年期间玉米和小麦农田水蚀模拟值的稳健性,并得出了坡度和日降水量对土壤侵蚀模拟的影响,提出了控制 EPIC 中水蚀方程的关键输入参数。Balković 等^[44]通过长期的土壤有机碳田间观测,探讨了 EPIC-II ASA 网格模型在不同农业管理措施下土壤有机碳变化的适用性。Castaño-Sánchez 等^[45]开发并验证了 EPIC 模型的地理空间版本(Geospatial-EPIC-UY),模拟草地产量与生产力指数的相关性达 0.64,分析了土地利用类型的变化对碳通量的潜在影响。土壤侵蚀是影响土壤碳动态不可忽略的重要因素,但 EPIC 模型在土壤侵蚀方面的应用较少,未来土壤侵蚀和土壤“双碳”研究中,EPIC 模型将会是一个重要的模型工具。

2.4 干旱评估

EPIC 模型也常用来评估气候干旱对作物生长的影响,这为气候变化下(极端)干旱事件的影响评估提供了很好的研究手段。例如,贾慧聪等^[46]基于 EPIC 模型,从全生育期和分生育期角度,作物产量观测值和模拟值拟合的平均误差为 0.082,定量评价了黄淮海夏播玉米旱灾的风险。王志强等^[47]运用 EPIC 模拟了中国多年典型小麦生长过程,构建了基于水分胁迫

迫的小麦干旱致灾强度指数,对中国小麦干旱致灾强度和风险的时空分布规律进行了定量评估。孙可可等^[48]根据 EPIC 模型对不同灌溉水平下的旱灾损失率进行了定量研究,评估了云南元谋水稻春季干旱风险。Guo 等^[49]基于 EPIC 预测了未来 20 a 苜蓿和苹果树的作物生产力和土壤速效水含量,并评估了保护性耕作和传统耕作未来对土壤干层的修复潜力。EPIC 模型可以输入和模拟以日为步长的气候状况,可以和随机天气发生器结合进行较长时间尺度的模拟,可以用于历史气候研究和未来气候变化预测下的水土、作物状况。气候变化已成不争的事实,因此,EPIC 模型对于干旱、洪水等极端天气下的水土和作物生产研究具有重要的应用前景。

3 展望

3.1 EPIC 模型模块调用及参数修正研究

EPIC 模型中部分公式调用和修正是 EPIC 模型未来的一个重要研究方向。例如,在中国及世界上的其他地区,在应用 R(USLE)对土壤可蚀性 K 值进行计算时,多采用 EPIC 模型 K 因子方法计算^[50]。然而,由于 EPIC 模型是在美国开发的,在其他地区进行应用时,需要对其中的关键参数进行本地化,必要情况下需要对模型的数学公式进行修正,才能更为准确地进行模拟和预测。

此外,EPIC 模型可应用于不同空间尺度,当尺度较大时,学者们多用样地数据对模型进行修订,忽略了模型应用时的尺度效应问题。因此,在较大尺度时,可采用遥感数据反演结果提高 EPIC 模型本地参数化的精度^[51],提高模型参数的精确度是未来该模型的研究方向。

3.2 EPIC 模型与机器学习和深度学习耦合研究

机器学习和深度学习具有较高的预测性能,基于过程的 EPIC 模型与其耦合应用具有广泛的前景。目前,已开展了这方面的工作。例如,Folberth 等^[52]基于 EPIC 模型和梯度增强、随机森林算法预测了全球尺度玉米产量、蒸散量和作物有效水分等,并发现其具有很高的预测精度。Lee 等^[53]基于 EPIC 模型和增强回归树算法,估算了美国中西部在 21 世纪 4 种气候变化情景下对未来玉米生命周期的环境影响。目前,模型耦合是地理学和生态学等的研究方向,而 EPIC 模型可研究的内容广,机器学习和深度学习也是目前研究的重要导向。因而 EPIC 模型与机器学习和深度学习的耦合,进而深入水资源、土壤侵蚀、作物生产、双碳及气候变化等相关研究,将会是目前 EPIC 模型研究的重要方向。

4 结论

本文综述了 EPIC 模型问世 30 a(1991—2021)来的应用情况,基于 R 软件包 bibliometrix 进行了分析,通过文献计量分析方法快速地掌握了模型的应用动向和研究动态。

EPIC 模型模块多,研究内容广。近 30 a 来,该模型的相关发文章整体上呈现上升趋势,该模型的应用在我国也越来越广泛,应用前景广阔。应用 EPIC 模型开展的研究成果多,在许多期刊上都有发表。EPIC 模型在水资源与气候变化、作物生长、土壤侵蚀与有机物流失、农业干旱等方面具有广泛应用。EPIC 模型不仅可以模拟水量平衡和不同管理措施情境,还可以评估气候变化对作物生长和农业生态系统的影响。EPIC 模型在土壤侵蚀方面的应用不多,在作物产量方面研究较多。基于 EPIC 对土壤碳平衡的研究关注度较高,这为评估区域和全球碳循环及其对土壤侵蚀、土地利用和气候变化的响应研究提供了很好的研究工具和思路。

在未来的 EPIC 模型及相关研究中,应特别关注 EPIC 模型的应用及模型本地化问题。EPIC 模型与遥感信息反演的结合,是大尺度模型校正验证时的一个重要方向。此外,EPIC 模型与其他模型,特别是与目前流行的机器学习、深度学习模型的耦合,进而对不同情境下水土、作物生产及对气候变化的响应模拟和预测,将会是未来 EPIC 模型发展应用的重要研究方向。

[参 考 文 献]

- [1] Williams J R. The EPIC model [M]// Water Resources Publication, Highlands, CO. USA, Computer Models of Watershed Hydrology, 1995,909-1000.
- [2] Williams J R, Jones C A, Kiniry J R, et al. The EPIC crop growth model [J]. Transactions of the ASAE, 1989,32(2):497-511.
- [3] Williams J R. EPIC: The erosion-productivity impact calculator [J]. Transactions of the ASAE, 1989.
- [4] Williams J R, Jones C A, Dyke P T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity [J]. Transactions of the ASAE, 1984,27(1):129-144.
- [5] Pumijumong N, Arunrat N. Reliability and evaluation of the potential of the i_EPIC model to estimate rice yields in Thailand [J]. Agricultural Science Research Journals, 2012,2(12):614-22.
- [6] Singh V P. Computer models of watershed hydrology [M]. Water Resources Publications, 1995.

- [7] 范兰,吕昌河,陈朝. EPIC 模型及其应用[J]. 地理科学进展, 2012, 31(5): 584-592.
- [8] Wang Zhiqiang, Ye Li, Jiang Jingyi, et al. Review of application of EPIC crop growth model [J]. *Ecological Modelling*, 2022, 467: 109952.
- [9] Kar S K, Kumar S, Sankar M, et al. Process-based modelling of soil erosion: Scope and limitation in the Indian context [J]. *Current Science*, 2022, 122(5): 533.
- [10] Aria M, Cuccurullo C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis [J]. *Journal of Informetrics*, 2017, 11(4): 959-975.
- [11] Derviş H. Bibliometric analysis using bibliometrix an R package [J]. *Journal of Scientometric Research*, 2020, 8(3): 156-160.
- [12] Izaurralde R C, Williams J R, McGill W B, et al. Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 192(3/4): 362-384.
- [13] Doraiswamy P C, Moulin S, Cook P W, et al. Crop yield assessment from remote sensing [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003, 69(6): 665-674.
- [14] Wang X, Williams J R, Gassman P W, et al. EPIC and APEX: Model use, calibration, and validation [J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(4): 1447-1462.
- [15] Tan Guoxin, Shibasaki R. Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration [J]. *Ecological Modelling*, 2003, 168(3): 357-370.
- [16] Bash J O, Cooter E J, Dennis R L, et al. Evaluation of a regional air-quality model with bidirectional NH₃ exchange coupled to an agroecosystem model [J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(3): 1635-1645.
- [17] Schneider S H, Easterling W E, Mearns L O. Adaptation: sensitivity to natural variability, agent assumptions and dynamic climate changes [M] // *Societal Adaptation to Climate Variability and Change*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2000: 203-221.
- [18] Brown R A, Rosenberg N J, Hays C J, et al. Potential production and environmental effects of switchgrass and traditional crops under current and greenhouse-altered climate in the central United States: A simulation study [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, 78(1): 31-47.
- [19] Brown R A, Rosenberg N J. Sensitivity of crop yield and water use to change in a range of climatic factors and CO₂ concentrations: A simulation study applying EPIC to the central USA [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 83(3/4): 171-203.
- [20] Balković J, van der Velde M, Schmid E, et al. Pan-European crop modelling with EPIC: Implementation, up-scaling and regional crop yield validation [J]. *Agricultural Systems*, 2013, 120: 61-75.
- [21] Zhang Xuesong, Izaurralde R, Manowitz D, et al. An integrative modeling framework to evaluate the productivity and sustainability of biofuel crop production systems [J]. *GCB Bioenergy*, 2010, 2(5): 258-277.
- [22] Williams J R, Renard K G. Assessments of soil erosion and crop productivity with process models (EPIC) [M] // *Soil Erosion and Crop Productivity*. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2015: 67-103.
- [23] 李军, 邵明安, 张兴昌. EPIC 模型中农田水分运移与利用的数学模拟 [J]. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(2): 72-75.
- [24] Longo M, Jones C D, Izaurralde R C, et al. Testing the EPIC Richards submodel for simulating soil water dynamics under different bottom boundary conditions [J]. *Vadose Zone Journal*, 2021, 20(5): e20142.
- [25] Tahir N. Verification of soil moisture simulating accuracy on dry-land winter wheat and spring maize field by EPIC model on the loess plateau of China [J]. *Advances in Plants & Agriculture Research*, 2017, 6(3): 85-91.
- [26] 郝远远, 徐旭, 任东阳, 等. 河套灌区土壤水盐和作物生长的 HYDRUS-EPIC 模型分布式模拟 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 110-116.
- [27] 徐旭, 黄冠华, 黄权中. 农田水盐运移与作物生长模型耦合及验证 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(4): 110-117.
- [28] 朱焱, 刘琨, 王丽影, 等. 土壤水氮动态及作物生长耦合 EPIC-Nitrogen2D 模型 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(21): 141-151.
- [29] Wang Zhaozhi, Zhang T Q, Tan C S, et al. Simulating crop yield, surface runoff, tile drainage and phosphorus loss in a clay loam soil of the Lake Erie region using EPIC [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 204: 212-221.
- [30] Wang Xuechun, Samo N, Wang Mengran, et al. Dynamic changing of soil water in artificial ryegrass land in the hilly regions of Sichuan Basin area [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 221: 99-108.
- [31] Wang Zhaozhi, Zhang T Q, Tan C S, et al. Modeling the impacts of manure on phosphorus loss in surface runoff and subsurface drainage [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2019, 48(1): 39-46.
- [32] 王志强, 方伟华, 何飞, 等. 中国北方气候变化对小麦产量的影响: 基于 EPIC 模型的模拟研究 [J]. *自然灾害学*

- 报,2008,17(1):109-114.
- [33] Chavas D R, Izaurrealde R C, Thomson A M, et al. Long-term climate change impacts on agricultural productivity in Eastern China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009,149(6/7):1118-1128.
- [34] Zheng Fenli, Yang Qinke, Qin Chao, et al. Soil erosion environment background and its spatial distribution in China [M] // *Global Degradation of Soil and Water Resources*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022:173-186.
- [35] Balković J, van der Velde M, Skalský R, et al. Global wheat production potentials and management flexibility under the representative concentration pathways [J]. *Global and Planetary Change*, 2014,122:107-121.
- [36] Carr T W, Balković J, Dodds P E, et al. The impact of water erosion on global maize and wheat productivity [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 322:107655.
- [37] 王宗明,梁银丽.应用 EPIC 模型计算黄土塬区作物生产潜力的初步尝试[J].*自然资源学报*,2002,17(4):481-487.
- [38] 范兰,吕昌河,王学春,等.EPIC 模型对华北平原冬小麦与夏玉米生长和产量模拟的适用性评价[J].*麦类作物学报*,2014,34(12):1677-1684.
- [39] 郑娟.土壤条件指数与 EPIC 模拟土壤碳管理效率[J].*水土保持应用技术*,2007(6):18-19.
- [40] Zhang Jie, Balković J, Azevedo L B, et al. Analyzing and modelling the effect of long-term fertilizer management on crop yield and soil organic carbon in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,627:361-372.
- [41] Le K N, Jha M K, Reyes M R, et al. Evaluating carbon sequestration for conservation agriculture and tillage systems in Cambodia using the EPIC model [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018,251:37-47.
- [42] Lychuk T E, Izaurrealde R C, Hill R L, et al. Biochar as a global change adaptation: Predicting biochar impacts on crop productivity and soil quality for a tropical soil with the Environmental Policy Integrated Climate (EPIC) model [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2015,20(8):1437-1458.
- [43] Carr T W, Juraj B, Dodds P E, et al. Uncertainties, sensitivities and robustness of simulated water erosion in an EPIC-based global gridded crop model [J]. *Bio-geosciences*, 2020,17(21):5263-5283.
- [44] Balković J, Madaras M, Skalský R, et al. Verifiable soil organic carbon modelling to facilitate regional reporting of cropland carbon change: A test case in the Czech Republic [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020,274:111206.
- [45] Castaño-Sánchez J P, Izaurrealde R C, Prince S D. Land-use conversions from managed grasslands to croplands in Uruguay increase medium-term net carbon emissions to the atmosphere [J]. *Journal of Land Use Science*, 2021,16(3):240-259.
- [46] 贾慧聪,王静爱,潘东华,等.基于 EPIC 模型的黄淮海夏玉米旱灾风险评价[J].*地理学报*,2011,66(5):643-652.
- [47] 王志强,何飞,栗健,等.基于 EPIC 模型的中国典型小麦干旱致灾风险评价[J].*干旱地区农业研究*,2012,30(5):210-215.
- [48] 孙可可,陈进,许继军,等.基于 EPIC 模型的云南元谋水稻春季旱灾风险评估方法[J].*水利学报*,2013,44(11):1326-1332.
- [49] Guo Fuxing, Wang Yanping, Wu Fuyong. Conservation agriculture could improve the soil dry layer caused by the farmland abandonment to forest and grassland in the Chinese Loess Plateau based on EPIC model [J]. *Forests*, 2021,12(9):1228.
- [50] 李肖,唐鹏,林杰,等.应用¹³⁷Cs 示踪法估算淮北土石山区土壤可蚀性因子 K 值[J].*东北林业大学学报*,2019,47(6):31-39.
- [51] 杨鹏,吴文斌,周清波,等.基于作物模型与叶面积指数遥感影像同化的区域单产估测研究[J].*农业工程学报*,2007,23(9):130-136.
- [52] Folberth C, Baklanov A, Balković J, et al. Spatio-temporal downscaling of gridded crop model yield estimates based on machine learning [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019,264:1-15.
- [53] Lee E K, Zhang Wangjian, Zhang Xuesong, et al. Projecting life-cycle environmental impacts of corn production in the US Midwest under future climate scenarios using a machine learning approach [J]. *The Science of the Total Environment*, 2020,714:136697.