

文章编号:1672-3031(2010)03-0208-06

陆地生态系统模型及其与流域水文模型耦合的研究进展

彭辉, 贾仰文, 龚家国, 郝春洋

(中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 陆地生态系统在全球生态系统中起重要作用, 它与流域水文循环通过复杂的生理学过程和水文学过程相互影响、相互作用。本文对陆地生态系统模型及其与流域水文模型的耦合研究进行了综述和讨论。将陆地生态系统模型分为基于静态植被和动态植被两种类型, 讨论了两种类型包含的各种模型及其与流域水文模型耦合的研究进展和应用情况。阐述了陆地生态系统模型与流域水文模型耦合在气候变化和人类活动影响研究中的重要意义, 并分析指出两者耦合研究的发展方向。

关键词: 陆地生态系统模型; 流域水文模型; 耦合; 生态水文

中图分类号: X143

文献标识码: A

1 研究背景

生态水文学是20世纪90年代兴起的水文学和生态学的交叉学科, 其以生态过程和生态格局的水文学机制为研究核心^[1]。陆地生态系统在地球生态系统中起着重要的作用, 它与流域水循环过程相互作用、相互影响。一方面, 生态系统需要一定的水分条件作为支撑, 水文循环系统的变化会使生态系统发生演替^[2]; 另一方面, 不同植被条件下的产汇流过程不同, 生态系统的变化又反过来影响水文循环过程的演变, 并影响水资源的数量与构成。当今世界, 全球气候变化、下垫面改变等环境变化影响到地球各部分的相互作用, 涉及到发生在地球系统中的物理过程、生物过程和化学过程的相互作用。对生态水文过程的充分研究了解是分析气候变化及人类活动对流域自然环境、社会经济影响的基础。目前, 生态系统模型和流域水文模型都被广泛的开发应用, 加强二者的耦合可以更好的研究陆地生态系统与流域水循环的相互作用, 模拟评价气候变化和人类活动等变化对生态水文过程的影响, 具有十分重要的科学价值, 同时也可对未来区域发展政策制定提供参考。

2 陆地生态系统模型

20世纪中叶以来, 各种陆地生态系统模型陆续被研发出来, 这些模型模拟的侧重点各不相同, 能够从多方面模拟生态系统及其与其他过程的相互作用, 为生态系统的研究特别是其未来发展趋势预测方面提供了研究工具。陆地生态系统模型可分为基于静态植被和动态植被两种类型, 其研究进展分述如下。

2.1 基于静态植被的陆地生态系统模型 静态植被模型是用来表述植被类型、植被生长与地理条件的数量关系, 其中植被类型或地理条件是相对固定的。早期的陆地生态系统模型多属于这种类型, 根据研究内容的不同, 又可以细分为生物地理模型、生物地球化学模型和陆面生物物理模型等^[3]。

2.1.1 生物地理模型 生物地理模型是用于模拟陆地生态系统类型的潜在自然分布, 描述气候和自然

收稿日期: 2010-03-31

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(50779074); 国家自然科学基金创新研究群体基金资助项目(50721006); 国家重点基础研究发展规划资助项目(2006CB403404); 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流资助项目(50721140161)

作者简介: 彭辉(1984-), 女, 山东泰安人, 博士生, 主要从事流域水循环和陆地生态系统相互作用研究。

E-mail: penghui_scu@163.com

植被分布之间关系的非机理性模型^[4]。其中比较著名的模型有 Holdridge 模型^[5]、Box 模型^[6]、DOLY 模型^[7]、BIOME 系列模型^[8-11]及 MAPSS 模型^[12]。这类模型模拟植被的潜在分布是基于植被各种限制因素(例如气候、植被生理等)与植被分布的统计关系。例如 Holdridge 模型是根据年降水量、气温、年蒸散发等多个气候要素组合来界定植被分布区域,而 BIOME1 模型则考虑了生物气候变量和生理生态限制因子来模拟生态系统的分布,随后发展的 BIOME2、BIOME3 模型考虑了水碳循环和各种干扰因子,可以模拟区域生态系统的总 LAI 和 NPP。生物地理模型是基于统计而非过程机理的模型,模型结构简单、方便应用,但其与基于过程的水文模型的耦合难以实现,且两者的尺度差异较大,尚未有二者的耦合研究。

2.1.2 生物地球化学模型 生物地球化学模型是在固定植被类型和土壤类型的基础上,根据生物生理学和生物化学原理模拟植被的净初级生产力、碳和营养物质的循环。代表性模型有 BIOME-BGC^[13]、TEM^[14]、CENTURY^[15]、CASA^[16]及 CEVSA^[17]。这类模型考虑了大气-植被-土壤之间的相互联系,根据机理模拟植被生长过程的碳、氮和水循环。根据研究目的不同,各个模型模拟的重点也有所不同。BIOME-BGC 模型模拟生态系统的光合、呼吸作用及土壤微生物分解过程,计算植物、土壤、大气之间碳和养分循环以及温室气体交换通量^[18],适用于各种生态系统。CENTURY 模型主要基于土壤结构功能,侧重土壤和植被的生物化学循环过程,主要考虑碳、氮和磷三种营养物质,模拟生态系统生产力和管理措施影响,它最初用于草地生态系统模拟,现在也广泛应用于森林、农田等生态系统^[19-20]。CASA 模型基于植被生理过程,主要利用 APAR 和光能利用效率 ϵ 模拟植物生产力,需要遥感数据支持,可以用于估算流域或区域尺度的生产力^[21]。这一类模型模拟过程比较复杂,参数众多,且植被类型和土壤类型固定,无法实现植被动态变化的模拟,对于气候变化对植被的影响反映不全面。生物地球化学模型考虑了植被生长过程中的水循环,可以与水文模型进行耦合研究生态水文的相互影响过程。

2.1.3 陆面生物物理模型 陆面生物物理模型是根据能量平衡、物质平衡和动量平衡原理,计算植被与土壤、大气之间的水、热和二氧化碳通量、动量交换,物理基础明确。其代表性模型有 SiB^[22]、LSM^[23]、VIC^[24]等。这类模型可以为大气环流模式提供合理的陆面参数化方案,其时间步长较短,有助于利用陆气交换的涡度相关法测定资料进行验证和校准。这类模型通常使用光合作用公式、气孔传导公式和参数化的呼吸公式模拟生态系统和大气之间能量、水分和二氧化碳的交换过程,但对植被和土壤中的生物化学过程描述简单,特别是植被的生长变化过程不能详细模拟,且模型模拟空间尺度较大。因为陆面生物物理模型对土壤、植被、大气之间的水碳通量有很详细的模拟,常与全球气候模式(GCM)耦合模拟,也可以与大尺度的水文模型进行耦合研究。

2.2 基于动态的陆地生态系统模型 由于静态的陆地生态系统模型不能模拟植被类型和分布的变化,无法反映气候变化和二氧化碳浓度变化条件下生态系统的演变规律,也无法预测未来全球生态系统的情况,基于动态的陆地生态系统模型逐渐成为当前生态系统模拟领域的研究热点。根据其模拟内容的不同,可分为动态植被模型、动态植被-生物地球化学耦合模型、动态植被-陆面生物物理耦合模型。

2.2.1 动态植被模型 动态植被模型是利用植被动力学原理,在一个模拟框架中模拟生态系统物质循环、冠层生理过程、植被动态变化过程。动态模拟的过程包括通过冠层导度、光合作用和水分循环之间的反馈,植被生理快速过程与生态系统慢速过程(包括资源竞争、植被结构变化、土壤和凋落物碳循环以及火灾等干扰)的耦合^[3]。代表模型是 LPJ^[25],它考虑生态系统内部自然死亡和自然干扰(火灾)等因素,模拟植被光合作用、呼吸作用、气孔传导、叶片生长凋落、资源竞争、植被种群变化、土壤微生物分解等过程,计算植物-土壤-大气之间的水和二氧化碳交换通量、植被初级生产力和生态系统的动态水碳循环,在大区域动态模拟中有广泛应用。另一类动态植被模型是根据种群竞争理论建立,代表模型是 TRIFFD^[26],它将种群模型和光合作用模型进行耦合,根据光合作用的模拟预测更新植被的覆盖率和种群结构(叶面积指数和高度),模型计算效率高,经常与气候模式耦合计算。这类模型可以模拟植被类型和植被结构的变化,可以与水文模型耦合研究未来气候变化条件下

植被变化对水文循环的影响。

2.2.2 动态植被-生物地球化学耦合模型 动态植被-生物地球化学耦合模型将生物地球化学模型中固定输入的植被类型换成动态植被模型模拟的变化的植被类型，更符合实际情况。这一类模型比动态植被模型更详细描述了植被生理生态过程，对生态系统水、碳和营养物质的模拟更加详细。代表模型有HYBRID^[27]和LPJ-TEM^[28]模型。HYBRID模型可以模拟个体树种和草之间对光、水和氮之间的竞争，预测不同植被种类和植被类型间未来的优势性，也可以评价不用大气环境下的植物种群结构变化。LPJ-TEM模型将动态植被模型LPJ和生物化学模型TEM进行耦合，两种模型间以月为时间步长进行信息交互，在每一种植物功能类型中模拟计算碳、氮和水分的流通以及植被初级生产力^[29]。

2.2.3 动态植被-陆面生物物理耦合模型 动态植被-陆面生物物理耦合模型在计算植被、土壤和大气的物质交换时使用动态变化的植被类型，考虑植被生理特性变化与大气反馈作用，实现植被和气候变化的双向耦合，可以模拟预测未来气候和植被的变化。最著名的模型是IBIS^[30]，它模拟全球碳循环变化，在小时尺度耦合模拟水、能量和碳通量来估算年尺度上的水碳平衡，根据年度的碳平衡预测叶面积指数和生物量，模型把植被分为九种功能类型，每种功能类型有不同的光和水的竞争策略，最终实现对生物物理学、生物地球化学和植被演替等自然过程的模拟。

基于动态的陆地生态系统模型比静态的模型更具合理性，适用性也更广，成为未来陆地生态系统模型发展的方向，但目前模型还存在空间单元较大、通用性较差等不足。

各类生态系统模型的对比见表1。

表1 各类生态系统模型对比

模型类型	代表模型	特点	缺点
基于静态的陆地生态模型	生物地理模型 Holdridge、Box、DOLY、BIOME、MAPSS。	基于统计计算，结构简单、方便应用	不能模拟生态过程，不能用于与水文模型耦合
	生物地球化学模型 BIOME-BGC、TEM、CENTURY、CASA、CEVSA	根据机理模拟植被生长过程的碳、氮和水循环过程	过程比较复杂，参数较多，不能反映植被演替过程
	陆面生物物理模型 SiB、LSM、VIC	根据能量平衡、物质平衡和动量平衡原理，计算植被与土壤、大气之间的水、热和CO ₂ 通量、动量交换，物理基础明确	对植被的生长变化过程不能详细模拟，且模型模拟空间尺度较大。
基于动态的陆地生态模型	动态植被模型 LPJ、TRIFFD	动态模拟生态系统，可以反映资源竞争、植被结构变化、土壤和凋落物碳循环以及火灾等过程的影响	模拟空间尺度较大，动态因素考虑的较简单
	动态植被-生物地球化学耦合模型 HYBRID·LPJ-TEM	使用动态植被模型模拟的变化的植被类型，可以反映植被对资源的竞争过程	模拟过程复杂，参数较多
	动态植被-陆面生物物理耦合模型 IBIS	实现植被和气候变化的双向耦合，可以模拟预测未来气候和植被的变化	空间单元较大

3 陆地生态系统模型与流域水文模型耦合研究

为了更准确的理解流域内的植被生长、水分利用、水文循环等过程的相互联系，精确模拟流域的生态水文循环过程，陆地生态系统模型与流域水文模型的耦合研究工作陆续展开。

3.1 生物地球化学模型与流域水文模型的耦合 由于生物地球化学模型可以详细描述植被生长的物质、水分循环，将生物地球化学模型与流域水文模型耦合可以模拟流域的生态水文相互过程。其中最著名的是RHESSys (Regional HydroEcological Simulation System)。最初的RHESSys是将BIOME-BGC

模型的前身FOREST-BGC模型与流域水文模型TOPMODEL进行耦合,在流域尺度探讨生态过程和水文循环的相互反馈^[31]。FOREST-BGC是森林生态系统模型, TOPMODEL是一个以地形和土壤为基础的半分布式流域水文模型,它具有参数较少、物理基础明确等特点。在RHESSys中TOPMODEL的土壤水模拟过程取代了FOREST-BGC模型中原有的简单土壤水模块,加入了土壤水纵向入渗过程以及壤中流过程,使FOREST-BGC模型中植被土壤水吸收过程更准确,同时土壤出流过程也比单独使用流域水文模型计算更加准确。由于模型的计算单元划分是基于地形参数的分布,所以模型计算可以分析土壤水空间分布与地形的关系,以及植被生长状况与地形的关系。模拟中各种水碳通量过程的耦合可以更加准确地反映区域尺度上陆地与大气的交换过程。

经过多年的研究,RHESSys不断完善。现在的版本中加强了土壤生物化学过程的模拟,借鉴了CENTURY模型中土壤模拟的内容。水文模拟部分也使用一个基于DHSVM^[32]的直接演算模型代替了TOPMODEL模型。RHESSys模型已经在流域生产力、碳氮循环模拟等领域有很多研究应用^[33]。

除了RHESSys以外,描述流域生态水文过程的模型还有Macaque^[34]和Topog^[35]等,这两个模型是在模型建立中就考虑了植被生长过程和流域水文循环,而不是把现有模型进行耦合。

3.2 陆面生物物理模型与流域水文模型耦合 陆面生物物理模型与流域水文模型耦合有广泛的应用,现有的很多分布式水文模型都考虑了陆面生物物理过程。如分布式水文模型WEP,参照了ISBA模型,采用Penman公式或Penman-Monteith公式等进行蒸散发计算^[36]。谢正辉等利用VIC模型构建大尺度的陆面水文模型,模型分辨率网格选取50km×50km,按网格来准备植被和土壤参数,用距离权重插值方法进行气象数据的插值,输出模型结果与渭河流域部分子流域实测资料进行比较,吻合程度较好^[37]。

3.3 动态植被模型与流域水文模型耦合 动态植被模型的出现为研究植被在气候变化条件下的演变过程提供了条件,同时动态植被模型与流域水文模型耦合可以将植被变化的过程反映在水文模拟过程中。袁飞采用LPJ模型模拟的不同气候变化情景下的植被动态变化,再将植被动态变化信息运用到流域水文模型新安江水文模型中,研究气候变化引起的植被变化对水文循环过程的影响^[38]。

3.4 基于物理基础的分布式水文模型中生态系统模型的耦合 基于物理基础的分布式水文模型将水循环的各要素过程联系起来进行详细模拟,其中一部分模型考虑了陆地生态系统的作用,不同程度上耦合了生态系统模型。例如MIKE SHE模型中包括了土壤作物系统仿真模型DAISY,SWAT模型中利用一个单一植物生长模型来模拟所有类型的植被覆盖^[36]等。

4 结论与讨论

综上所述,陆地生态系统模型可分为静态模型和动态模型两大类,包括生物地理模型、生物地球化学模型等多种类型。各种类型的陆地生态系统模型与流域水文模型有不同程度的耦合研究,对生态水文相互作用研究有很大的贡献。但生态系统模型和流域水文模型的耦合仍处在探索阶段,发展较完善的RHESSys侧重于生态过程,还不能充分体现生态过程对水循环过程的影响,特别是对于大尺度流域。

气候变化和人类活动对自然环境的影响是当前的研究热点,未来生态水文关系在气候变化和人类活动影响下如何变化成为了众多研究者关注的问题。生态系统模型和流域水文模型耦合研究可以对未来气候变化和人类活动影响下生态水文过程的演化进行预测模拟,为生态保护修复和流域综合规划提供决策支持。模型耦合研究的未来发展方向主要有:(1)将地理信息系统和遥感技术与生态水文相互作用的建模过程相结合,加强宏观尺度上生态水文耦合模型的应用;(2)加强生态系统变化和水循环过程监测,根据不同的目的利用测量数据建立相应尺度的模型,以便加深对不同区域各种尺度生态系统与水循环相互作用的认识;(3)加强动态植被模型的研究及其与流域水文模型的耦合,以实现对未来植被类型和分布变化的预测,更好的模拟生态水文过程的变化。

参 考 文 献:

- [1] Baird A J, Wilby R L . 生态水文学——陆生环境和水生环境植被与水分关系[M] . 北京: 海洋出版社, 2002 .
- [2] Chapin F S, Matson P A, Mooney H A . 陆地生态系统生态学原理[M] . 北京: 高等教育出版社, 2005 .
- [3] 毛留喜, 孙艳玲, 延晓冬 . 陆地生态系统碳循环模型研究概述[J] . 应用生态学报, 2006, 17(11): 2189-2195 .
- [4] Zhou G S, Wang Y H . Global change and climate-vegetation classification[J] . Chinese Science Bulletin, 2000, 45(7): 577-585 .
- [5] Holdridge L R . Determination of world formations from simple climatic data[J] . Science, 1947, (105): 367-368 .
- [6] Box E O . Macroclimate and plant forms: an introduction to predictive modeling in phytogeography[M] . The Hague, Dr. W Junk publisher . 1981 .
- [7] Woodward F I . Climate and Plant Distribution[M] . Cambridge, Cambridge University Press, 1987 .
- [8] Prentice I C, Cramer W, et al . Global biome model: predicting global vegetation patterns from plant physiology and dominance, soil properties and climate[J] . Journal of Biogeography, 1992(19): 117-134 .
- [9] Haxeltine A . Modelling the vegetation of the world[D] . Lund University . Ph . D . 1996 .
- [10] Haxeltine A, Prentice I C . BIOME3: an equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types[J] . Global Biogeochemical Cycles, 1996(10): 693-709 .
- [11] Kaplan J O . Geophysical applications of vegetation modeling[D] . Lund University . Ph . D . , 2001 .
- [12] Neilson R P . A model for predicting continental scale vegetation distribution and water balance[J] . Ecological Application, 1995(5): 362-385 .
- [13] Running S W, Hunt R E . Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME—BGC, and an application for global—scale models[M] . San Diego, Academic Press, 1993 .
- [14] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, et al . Global climate change and terrestrial net primary production [J] . Nature, 1993(363): 234-240 .
- [15] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, et al . Observation and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide[J] . Global Biogeochem Cycles, 1993(7): 485-809 .
- [16] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al . Terrestrial ecosystem production, a process model based on global satellite and surface data[J] . Global Biogeochemical Cycles, 1993(7): 811-841 .
- [17] Cao M K, Woodward F I . Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystem and their responses to climate change[J] . Global Change Biology, 1998(4): 185-198 .
- [18] 董文娟, 齐晔, 李惠民, 等 . 植被生产力的空间分布研究—以黄河小花间卢氏以上流域为例[J] . 地理与地理信息科学, 2005, 21(3): 105-108 .
- [19] 张永强, 唐艳鸿, 姜杰 . 青藏高原草地生态系统土壤有机碳动态特征[J] . 中国科学D辑, 地球科学, 2006, 36(12): 1140-1147 .
- [20] 黄忠良 . 运用Century模型模拟管理对鼎湖山森林生产力的影响[J] . 植物生态学报, 2000, 24(2): 175-179 .
- [21] 陈正华, 麻清源, 王建, 等 . 利用CASA模型估算黑河流域净第一性生产[J] . 自然资源学报, 2008, 23(2): 263-273 .
- [22] Sellers P J, Mintz Y, Sud Y . A simple biosphere model(SiB)for use within general circulation models[J] . Atmosphere Science, 1986(6): 505-531 .
- [23] Bonan G B . Land-atmospheric interactions for climate system models: Coupling biophysical, biogeochemical and ecosystem dynamical processes[J] . Remote Sense Environment, 1995(51): 57-73 .
- [24] Liang Xu, Lettenmaier D P, Wood E F . A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models[J] . Journal of Geophysical Research, 1994, 99(7): 14415-14428 .

- [25] Sitch S, Smith B, Prentice I C . Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic vegetation model[J] . *Global Change Biology*, 2003(9): 161–185 .
- [26] Cox P M, Betts R A, Jones C D . Modeling vegetation and the carbon cycle as interactive elements of the climate system[M]//Pearce R, ed . *Meteorology at the Millennium* . New York, Academic Press, 2001 .
- [27] Friend A D, Stevens A K, Knox R G . A process-based terrestrial biosphere model of ecosystem dynamics (Hybrid v. 3.0)[J] . *Ecology Model*, 1997(95): 249–287 .
- [28] Pan Yude, Hom J, Jenkins J C . Importance of foliar nitrogen concentration to predict forest productivity spatially across the Mid-Atlantic region[J] . *Forest Science*, 2004(50): 279–289 .
- [29] Pan Yude, McGuire A D, Melillo D W, et al . A biogeochemistry-based dynamic vegetation model and its application along a moisture gradient in the continental United States[J] . *Journal of Vegetation Science*, 2002(13): 369–382 .
- [30] Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N . An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics[J] . *Global Biogeochemical Cycle*, 1996(10):693–709 .
- [31] Band L E, Patterson P, et al . Forest ecosystem processes at the watershed scale: incorporating hillslope hydrology [J] . *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993(63): 93–126 .
- [32] Wigmosta M S, Vail L W, et al . A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain[J] . *Water Resources Research*, 1994, 30(6): 1665–1679 .
- [33] Tague C L, Band L E . RHESSys: Regional Hydro-Ecologic Simulation System—An Object-Oriented Approach to Spatially Distributed Modeling of Carbon, Water, and Nutrient Cycling [J] . *Earth Interactions*, 2004(19): 1–42 .
- [34] Watson F G R, Vertessy R A, et al . Large-scale modelling of forest hydrological processes and their long-term effect on water yield[J] . *Hydrological Processes*, 1999, 13(5): 689–700 .
- [35] Vertessy R, Hatton T, et al . Predicting water yield from a mountain ash forest catchment using a terrain analysis based catchment model[J] . *Journal of Hydrology*, 1993(150):667–700 .
- [36] 贾仰文, 王浩, 倪广恒, 等 . 分布式流域水文模型原理与实践[M] . 北京: 中国水利水电出版社, 2005 .
- [37] 谢正辉, 刘谦, 袁飞, 等 . 基于全国 50km×50km 网格的大尺度陆面水文模型框架[J] . *水利学报*, 2004(5): 76–82 .
- [38] 袁飞, 朱跃娟 . 考虑植被动态变化的水文过程模拟研究[J] . *水科学研究*, 2007, 1(1): 50–57 .

Research advances in terrestrial ecosystem models and their coupling with hydrological models

PENG Hui, JIA Yang-wen, GONG Jia-guo, HAO Chun-feng

(Department of Water Resources, IWHR, Beijing 100038, China)

Abstract: Terrestrial ecosystem is important in the global ecosystem, it interacts with watershed hydrological cycle through complicated biophysiology process and hydrological process. Researches of terrestrial ecosystem models and their coupling with hydrological models are reviewed. In terrestrial ecosystem models, vegetation is classified into two categories: static and dynamic. Researches and applications of terrestrial ecosystem models under these two categories and their coupling with hydrological models are discussed. The significance of coupling terrestrial ecosystem models with hydrological models in climate change and human activities impact research is illuminated, and the future coupling directions are analyzed as well.

Key words: terrestrial ecosystem model; watershed hydrological model; coupling; ecohydrology

(责任编辑: 韩 昆)