

文章编号 1001-8166(2006)08-0879-02

## “Ecohydrology of Water-controlled Ecosystems—Soil Moisture and Plant Dynamics” 评介

水文学是众多地学分支中发展最快的学科之一,约 40 年前水文学开始成为一门研究流域水流运动物理规律的专门学科,30 年前人类开始认识到水是控制全球气候的主要因素之一,三态水之间的转化和循环成为研究热点,在近 10 年内,人类进一步认识到水循环强烈影响着氮、碳等元素的循环,陆地生物圈内水资源的可获得性控制着植物的生长、氮元素的提升以及碳蓄积速率,植被因素和水文循环开始同时受到气候、水文以及生态学研究组织的高度重视,水文学发展到了生态水文学阶段。生态水文学自诞生之日起就在朝着两个不同的方向发展:一类是由生态学家发起的集中于植被对微气候响应的研究,另一类是由水文学家发起的不同复杂程度的水文模型与植物模型耦合研究。如此看来生态水文学进一步的发展必将是:前者会不断增加观测试验的分类程度,而后者则会逐渐提高模型的复杂程度,两个方向交叉的可能性将很小。但 Ignacio Rodriguez-Iturbe 与 Amilcare Porporato 吸收了成熟的非线性科学思想以及早期发展的降水模型随机理念,提出了一种在解释各种生物物理过程时既能保证其简单性又不失系统非线性本质的低维模型,为生态水文学的两个发展方向找到了一个交叉点,也为该学科创造了一个全新的学科增长点。

由普林斯顿大学人文与环境工程学院教授 Ignacio Rodriguez-Iturbe 与杜克大学副教授 Amilcare Porporato 编著并由剑桥大学出版社于 2004 年出版的“Ecohydrology of water-controlled ecosystems—soil moisture and plant dynamics”一书系统综述了 Rodriguez-Iturbe 学派近年来在生态水文学领域的研究成果,试图在不同时空尺度上揭示水文过程和生态过程动态之间的相互联系。土壤水分和植物是该书的两个主要内容,前者是水文循环的核心,后者则代表了陆地生态系统的重要组分,二者之间相互关系的分析是整个生态水文学的主旨,本书从降水随机模式在土壤—植被—大气非线性系统中的传播出

发,讨论了降水随机性如何产生不同的土壤水分变异模式,这些模式又是如何影响生态系统结构和功能。全书共分为 11 章,重点解决水分制约生态环境中的六个主题。

第一章绪论从水分制约生态环境中的生态水文特征、模型简化假设基础、分析问题的时空尺度、土壤水分与养分关系、土壤水分动态与生态系统结构关系等方面综述了全书的主题以及思路,通过不同的实例阐述了全书分析和解决问题的哲学依据。

第二章至第五章讨论土壤水分的随机性以及土壤水分随机性对植被水分胁迫的影响(主题一)。第二章也是该书乃至整个 Rodriguez-Iturbe 生态水文学派的理论基础与数学基础,从降水的随机性出发, Rodriguez-Iturbe 提出了一个量化分析土壤水分动态的数学工具,并就模型假设的合理性、模型求解的可能性(土壤湿度概率密度函数的导出)、模型敏感性、模拟结果可信度等进行了讨论,此外还将该模型与 Milly 土壤水分动态简化模型进行了对比分析,结果表明 Rodriguez-Iturbe 模型比 Milly 模型表现出更多的模型行为。第三章在前一章的基础上进一步指出土壤水分波动强度以及波动持续时间直接影响着植物的各种生理动态,通过数学推导获得了短噪音影响下的土壤水分联合概率分布函数,分析了气候、土壤和植被对土壤水分偏离某些特殊状态(如:凋萎系数、水文吸湿点等)的时间和频度的影响。在分析土壤水分和植被水分状况相互联系的基础上,第四章使用前一章获得的土壤水分平均联合概率函数定义了一个植物水分胁迫状态参数,用来反映土壤水分亏损状况的强度、持续时间以及发生频度。第五章中将随机土壤水分动态和植被水分胁迫动态方程运用到一些具体的生态系统中,量化评价了这些生态系统中环境条件对一些植物种的适宜程度和这些物种生存或共存的最佳环境条件,案例包括南非尼罗谷(Nylsvley)不同植物种的土壤水分动态研究、德堪萨斯州南部萨瓦纳生态系统对气候波

动的敏感性研究,科罗拉多稀树草原土壤质地对土壤水分和植被水分胁迫动态的影响,沿卡拉哈伊降水梯度植被格局研究、南非萨瓦纳气候中植被冠层对土壤水分和植被水分胁迫动态的影响研究。

第六章讨论水循环和碳循环的耦合以及二者在大气边界层的相互作用(主题二)。土壤—植被—大气动态涉及不同的时间尺度,时间上的升尺度,即从小时尺度上(研究气孔控制和蒸散发)到天—季尺度(土壤水分和植被生长动态)对理解小时间尺度上的各种过程如何控制大时间尺度上的水流、碳流动态以及生态系统演化至关重要,本章的分析提供了升尺度分析蒸散发/碳蓄积动态的理论基础,通过耦合土壤—植被—大气连续体(SPA<sub>C</sub>)方程与大气边界层简化模型,研究土壤、植被和边界层特征在暴雨期间的土壤水分、蒸散发和碳蓄积日过程,在天的时间尺度上整合变量的时间动态,获得碳蓄积经验关系,将之与土壤水分动态随机模型耦合得到生长季土壤水分碳蓄积的概率描述。

第七章讨论植被水分利用策略,植物对土壤水分的利用强度和广度(主题三)。在土壤水分含量较低时期内,蒸散发也会相应的减少,单元细胞随着时间的增加会产生一系列的损伤,同时在给定的土壤和气候外部条件下,植被又可能对水平衡产生影响,以减少水分胁迫。水分制约生态系统中植物水分需求通常要大于供给,为了更好的应对水分胁迫,植物必须完善各自的应对策略,水分匮乏状况发生的越是频繁,越是无规律性,这种应对机制就应该越完善。本章包括 3 个分析案例,第一个是 Rodriguez-Iturbe 关于不同根系深度的 C<sub>3</sub> 和 C<sub>4</sub> 植物对土壤水分利用强度和广度的研究;第二个案例是 Fernandez-Illescas 等对土壤质地相反关系研究的延伸,用来评价其健康状况与年际降水波动和波动在产生植物水分胁迫模式差异上的作用,这种差异又导致了不同物种的相互共存;最后一个案例是蒸散发功能和植物渗透调节功能在随机水分获得条件下创造最佳水分利用格局的作用。

第八章与第九章从季节到年际、从点尺度到坡面尺度研究不同尺度上的土壤水分动态,分别讨论了土壤水分动态的时间和空间尺度问题(主题四)。第八章指出除生长季开始时的土壤水分初始条件外,降水和蒸散发需求的季节性以及年际降水波动也明显影响着土壤水分的时间动态,第九章从土壤垂直水流与边界水流两个方面分别讨论了随机土壤水分动态的空间尺度问题,值得注意的是本章中首

次在土壤水分动态随机模型中引入了对地形因素的考虑,为进一步研究地形因素对土壤水分动态的影响进行了有用的尝试。

第十章讨论土壤有机质和营养元素的循环,特别强调了碳、氮元素之间的关系(主题五),指出在水分制约生态系统中植物通常受到水分和养分的双重制约,研究植被胁迫需要综合分析水分和养分循环。土壤水分受到气候、土壤、和植被的共同作用,间接(通过对植被生长的影响,控制凋谢物的数量和组成)或直接(影响各要素相互作用的重要环节,如分解、滤去、植被提升)的控制着土壤碳、氮循环,因此土壤水分时间模式可以调节不同库之间流的顺序、决定生态系统不同尺度上各状态变量的时间动态。本章集中于土壤系统,着重分析了土壤水分对土壤碳、氮循环的直接影响,忽略了土壤水分对植被生长的间接影响。

第十一章使用前面的章节中提出的方法研究了植被空间自组织性的出现(主题六),指出了联系降水时空模式与植被结构的全新生态水文学研究方向。在许多生态系统中,包括热带雨林、半干旱草地、温带森林和萨瓦纳地区生态系统,植被均表现出一种强烈的自组织性,这些自组织格局的出现的原因可被归结于物种之间相互作用、物种散布能力、干扰模式以及气候和土壤特征等方面较大时空变异性。本章以萨瓦纳生态系统草木共存现象为例,使用草木水分竞争空间模型以及描述草木时空演化的元胞自动机模型,对水文变异性与生态系统结构之间关系进行了分析。对半干旱生态系统植被时空格局的理解可能是生态水文学中最具吸引力一个方面,是发展最快、研究最为广泛的主题之一。

该书是继 Andrew Baird 与 Robert Wilby 共同主编的“*Ecohydrology: Plants and Water in Terrestrial and Aquatic Environments*”一书以及 Peter Eagleson 主编的“*Ecohydrology: Darwinian Expression of Vegetation Form and Function*”一书之后在生态水文学领域又一指导性文献,绝大多数被收录的内容均由世界著名水文学家 Ignacio Rodriguez-Iturbe 撰写或在他的亲自指导下完成,内容精辟详实,推导严谨简练,分析犀利透彻,文笔优美流畅,适合相关领域的科研人员与研究生学习和参考。该书的详细目录可浏览 Cambridge University Press 的网站。

刘 鹤 赵文智。中国科学院寒区旱区环境与工程研究所临泽绿洲农田生态系统国家野外研究站 寒旱区流域水文及应用生态实验室供稿。