

流域径流泥沙对多尺度植被变化响应研究进展

张志强¹, 王盛萍¹, 孙 阁², 谢宝元¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083;

2. Southern Global Change Program, USDA Forest Service, Raleigh, NC 27606, USA)

摘要: 植被变化与流域水文过程构成一个反馈调节系统, 是目前生态水文学研究的重点对象。由于植被自身的生长发育以及受自然因素和人为干扰的作用, 植被变化具有多尺度性; 由于受流域水文环境的异质性和水文通量的变化性的影响, 流域水文过程也同样具有多尺度性。因此, 只有通过不同尺度生态水文过程分析, 才能揭示流域径流泥沙对植被变化的响应机理。从不同时空尺度回顾了植被生长、植被演替、植被分布格局变化、造林以及森林经营措施等对流域径流泥沙影响的主要研究成果; 概括了目前研究采用的 3 种主要方法, 即植被变化对坡面水流动力学影响的实验室模拟、坡面尺度和流域尺度野外对比观测实验以及水文生态模型模拟方法; 分析了植被变化与径流泥沙响应研究要考虑的尺度问题, 从小区尺度上推至流域尺度或区域尺度时应考虑不同的生物物理控制过程。研究认为, 要确切理解植被与径流泥沙在不同时空尺度的相互作用, 必须以等级生态系统的观点为基础, 有效结合生态水文与景观生态的理论, 从地质-生态-水文构成的反馈调节入手, 系统地理解植被变化与径流泥沙等水分养分之间的联系及反馈机制, 建立尺度转换的基础。同时, 作为有效的研究工具, 今后水文模型的发展应更加注重耦合植被生理生态过程以及景观生态过程, 从流域径流泥沙对多尺度植被变化水文响应的过程与机制入手, 为植被恢复与重建、改善流域水资源状况和流域生态环境奠定基础。

关键词: 植被变化; 径流泥沙; 尺度; 水文模型

文章编号: 1000-0933(2006)07-2356-09 中图分类号: Q948.2 文献标识码: A

Runoff and sediment yield response to vegetation change at multiple scales: A review

ZHANG Zhi-Qiang¹, WANG Sheng-Ping¹, SUN Ge², XIE Bao-Yuan¹ (1. Key Lab. Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Southern Global Change Program, USDA Forest Service, Raleigh, Raleigh, NC 27606, USA). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7): 2356-2364.

Abstract One of the key research areas in modern ecohydrology is studying the feedbacks between vegetation dynamics in structure, distribution, and succession and hydrologic processes at multiple spatial and temporal scales. Coupling vegetation dynamics at multiple scales is essential to explore the mechanisms of water and sediment yield response to vegetation changes such as vegetation reestablishment, development, succession, distribution, and management practices. We reviewed literature on advances in studying the processes and mechanisms of the vegetation influence on runoff and sediment production in relations to vegetation growth, vegetation succession, vegetation patterns and distribution, as well as afforestation and deforestation. Our review suggests that empirical experimental ecohydrological research methods include laboratory approach that employs hillslope hydrodynamic theories, field hillslope experiments, and watershed experiments. Watershed-scale simulation models are also well used in ecohydrological research. This study suggests that up-scaling the results of hydrological studies at small scales must take into account the interactions and feedbacks of geology-vegetation-hydrological processes in a hierarchical system. Understanding the feedbacks and dominant controlling mechanisms among vegetation, hydrology, erosion, and nutrient dynamics is the key to

基金项目: 国家重大基础研究发展规划资助项目(2002CB111502)

收稿日期: 2005-12-12; 修订日期: 2006-04-20

作者简介: 张志强(1967~), 男, 内蒙古人, 博士, 副教授, 主要从事森林生态水文、侵蚀控制与流域管理的研究与教学。E-mail: zhqzhang@bjfu.edu.cn

Foundation item: The project was supported by China Key Basic Research Program (973 Program) (2002CB111502)

Received date: 2005-12-12; **Accepted date:** 2006-04-20

Biography: ZHANG Zhi-Qiang, Ph.D. Associate professor, mainly engaged in ecohydrology and watershed management. E-mail: zhqzhang@bjfu.edu.cn

scaling research results at multiple scales Integration of landscape ecophysiological processes and hydrological processes in spatially distributed, physically-based hydrological modeling is the key to understanding the vegetation-hydrology-soil erosion and sediment yield processes.

Key words: vegetation dynamics; runoff and sediment production; scale

植被变化与流域水文循环及水文过程构成一个相互作用和相互影响的反馈调节系统, 其在生物地球化学循环中扮演着重要角色。一方面, 植被存在、生长、更新、演替以及分布格局变化对土壤特性、微地形产生影响, 从而影响径流泥沙产生, 另一方面, 径流泥沙产生可以改变土壤特性及微地理环境, 进而反作用于植被生长、更新、演替及植被分布, 引起植被变化。

植被变化不仅源于自然因素, 同时也源于人为干扰, 表现为多尺度性, 因此, 植被变化引起的水文响应机理研究必须从多尺度入手, 从微观到宏观、从短时间尺度到长时间尺度探讨植被变化影响径流泥沙形成的主要控制过程与机理。有关植被与径流泥沙水文响应的研究起步较早。早在 1877 年至 1895 年德国土壤学家 Wollny 设置第一个土壤侵蚀小区试验观测植被和地面覆盖物对防止降雨侵蚀和土壤结构恶化的影响^[1]; 1909 年美国设置第一个对比实验流域探讨森林覆被变化对流域产水量的影响^[2~5]。随着全球环境变化及超强度的资源采掘, 植被覆被日益减少, 水土流失严重, 径流泥沙对植被变化的水文响应研究日益引起广泛关注。发展至今, 有关植被与径流泥沙的相关研究已较为深入、全面。Imeson^[6]曾对植被与径流泥沙的相关研究进行系统分类, 认为第 1 类研究主要揭示微尺度生物过程对可蚀性等土壤特性的影响, 如土壤团聚性、土壤入渗性等^[7]; 第 2 类研究主要集中探讨植被及枯落物对地表的保护作用, 探讨植被如何减缓径流流速、减少雨滴击溅等^[8]; 第 3 类研究主要探讨干旱半干旱地区空间非连续的植被分布格局与径流、泥沙源汇区的相关关系^[9~11]。

尺度问题可分为过程尺度、观测尺度和模拟尺度^[12,13]。前述 3 类植被与径流泥沙相关关系的研究往往局限于某一过程尺度: 前两类多从微观时空尺度入手, 通过人工降雨或天然降雨实验, 根据小区或坡面观测结果探讨植被类型、植被覆盖或植被结构变化影响径流泥沙产生的机理及相关关系, 得到的多为经验性公式^[14], 第 3 类则往往从较大空间尺度(如景观尺度、流域尺度以及区域尺度等)和较长时间尺度入手, 这类研究起步较晚。植被变化影响流域径流泥沙水文响应既可源于宏观尺度森林经营措施, 也可源于火烧、病虫害以及人为干扰引起的较大时空尺度植被分布格局变化, 植被演替引起的群落结构变化, 以及单株植株生长引起的微尺度生理生态或树体结构变化等。虽然不同尺度具有不同的主要控制过程, 但多尺度来源的植被变化同时影响流域径流泥沙水文响应。由于野外非受控条件下不同尺度往往可以得到不一致的观测结果, 因此必须采用模拟模型对多尺度植被变化影响径流泥沙水文响应的过程进行有效耦合, 从而将异质性整合于其中。通过有效耦合每一过程尺度上植被与径流泥沙的相关关系可深入揭示流域径流泥沙对植被变化的响应机理。

本文拟从上述多尺度植被变化与径流泥沙相关关系、现有研究方法和手段以及相关研究的尺度问题等方面一一予以探讨, 旨在从过程与机制上深入认识流域径流泥沙对多尺度植被变化的响应机理, 为今后植被与径流泥沙相关研究提供一定参考依据, 并为植被重建, 有效遏止水土流失, 改善流域的水资源状况等提供理论依据。

1 植被变化对径流泥沙水文响应的影响

1.1 植被生长对径流泥沙的影响

植被生长是自然因素引起的植被变化。植被生长对径流泥沙的影响关键在于改变了降雨侵蚀动能。植被生长引起植物高度增加、根系伸长、叶面积增加、覆盖度增大, 植被结构发生变化, 植被对降雨的阻截再分配作用因此发生变化, 改变了降雨对地表的侵蚀击溅力。

目前关于植被生长影响径流泥沙的研究多集中于探讨植被结构变化特征对降雨分配的影响, 以及植被对地表的保护作用。张清春^[15]在总结植被与水土流失关系时曾将上述植被参数, 即植被覆盖度、叶面积指数、植被高度和有效根系密度等归结为影响水土流失的主要因素。王晗生等^[16]对植被结构防止土壤侵蚀的机理

研究曾作了较为详尽的评述。从植被覆盖度来看,各研究者由于研究条件不尽一致,结论稍有差异。如:黄土区林草植被保持水土的临界盖度被认为 40% ~ 60%,而 Lang 和 McCaffrey 在澳大利亚的实验资料则表明要使土壤流失与土壤侵蚀相平衡,植被覆盖应在 50% ~ 75%^[16]。植被高度的变化也显著影响土壤侵蚀:当植被覆盖度不变而植被高度变化时由于冠滴下雨雨滴直径及动能变化,溅蚀量发生变化。蔡强国等人的实验资料表明当植被高度为 3~ 4m 时植被已无消除雨滴动能的功能^[17]。

探讨植被生长对径流泥沙的影响需要分析植被生长的不同阶段以及植被生长的季节动态变化。当暴雨降水对土壤含水量及地表径流量有显著影响时,植被生长的季节动态变化对水文响应有重要影响^[18,19]。为了更准确地进行放牧场径流预测, Pierson^[20]等试图采用改进后的 SPUR2000 模型进行模拟,虽然模型低估了小流域的土壤侵蚀量,但模型有效联系了植被动态变化,模型中经营管理措施对土壤侵蚀模块影响较大。然而,目前较为系统地探讨不同生长阶段及植被季节动态变化下产流产沙规律的研究仍然较少^[21]。将植被生长变化的动态信息与产流产沙过程相结合有助于显著改善现有的水文及土壤侵蚀模型^[9],从生态水文的角度揭示径流泥沙响应于植被变化的内在机理。此外,由于植被生长可增加林冠截留、土壤入渗,以及蒸腾耗水,水量平衡发生改变,无论在干旱区或湿润区,都将改变径流泥沙的产生。从水量平衡角度探讨分析植被变化引起径流泥沙水文响应对于区域或流域等宏观尺度研究具有重要意义。

植被生长过程中枯枝落叶及土壤的改变也显著影响径流泥沙水文过程。随着植被生长枯枝落叶不断聚集,不仅有效减弱了雨滴分散土壤颗粒的动力,防止土壤侵蚀发生,同时枯枝落叶聚集增大了地表糙率,增强了其自身蓄水能力,有效分散、吸收径流,显著降低水流挟沙能力,减少径流汇集及泥沙搬运。虽然具有同一覆盖度,不同植被由于枯落物特性不同,土壤侵蚀不同,以丛生禾草为主的混合草地较草坪草地土壤侵蚀较少^[21~23]。植被通过改变土壤特性而改变径流、土壤侵蚀发生,实质上减少了超渗产流的几率^[14,17],这在以超渗产流为主的干旱半干旱地区尤为明显。

1.2 植被演替对径流泥沙响应的影响

植被演替实质为较大时空尺度的植被变化。植被演替引起群落结构发生改变,从而改变了降雨对地表的侵蚀能力。在无人为干扰下,植被正向演替形成顶级群落,植物群落结构复杂化,生物生产力提高,群落系统功能完善,降雨侵蚀动能经不同冠层及地表枯落物覆被层逐级递减,从而减少径流泥沙,发挥较强的水文生态功能。刘伦辉等^[24]研究表明滇中山地各植被群落的水土保持功能大致与群落进展演替阶段相吻合,即:常绿阔叶林>常绿针叶林>次生荒草坡>旱作地与光秃地。然而,往往由于人类活动的干扰,如垦荒、木材砍伐、薪炭林开采以及过度放牧等,植被演替逆向发展,使群落结构单一,植被稀疏,降雨侵蚀动能不能被有效耗散。地中海干旱半干旱地区的生态系统在人为干预和土地弃耕等交替活动的驱动下,植被群落经过不同阶段的退化、更新,最终形成镶嵌式的空间结构^[25],从源、汇区理论来看,这种空间分布格局控制影响着径流泥沙等生态水文过程。植被演替引起群落结构发生变化,并进而改变了枯落物层及土壤层的有机质含量,改变了土壤入渗特性,使得径流泥沙水文过程发生变化。

1.3 植被分布格局对流域径流泥沙水文响应的影响

植被分布格局变化多源于放牧、弃耕等人为干扰。植被分布格局对径流泥沙水文响应的影响研究起步较晚。植被空间分布格局影响径流过程的连续性,径流、泥沙、污染物等汇集受植被空间分布格局影响,理解植被空间分布格局对于生态系统健康及山坡水文学的研究具有重要意义^[26~28]。从单个小区尺度或坡面尺度看,地表径流量及径流深在坡面上的分布对于研究侵蚀过程至关重要,当上推至流域尺度时,地形、土壤及植被分布则较为重要^[29]。植被分布格局对径流泥沙影响的实质在于植被斑块的镶嵌式分布导致水流分散,水流挟沙能力逐渐降低。在以超渗产流为主的干旱半干旱地区,裸地土壤往往由于土壤结皮的存在而降低入渗率,产生地表径流;而植被覆盖的土壤则因改善的土壤特性,入渗率增大,成为降水吸收区,从而导致径流泥沙源汇区的产生。

关于植被分布影响径流泥沙的研究多局限于干旱半干旱地区,且多结合景观生态学理论进行探讨。较多

研究直接分析植被斑块与径流泥沙相关关系。Ludwig 等^[30]比较分析了各种斑块特征对径流、泥沙、及养分的截获能力, 结果表明带状斑块较点状斑块径流截持率增加约 8%, 且由于土壤养分的截持, 植物生产力提高近 10%。此外, 植被斑块大小、斑块面积、斑块数等也常应用于此类研究。然而, 上述指标仅能给出植被空间分布的相关信息, 缺乏与地质-生态过程的联系。植被变化对径流泥沙的影响同时还与地质过程相关。目前很少研究采用可直接联系土地退化过程的指标定量化分析植被空间分布。为了将植被分布格局与地质-生态过程有效耦合, Prinsen 等^[6]曾确立了一系列相关指标定量化描述植被的空间分布状况, 如: 空隙度(Lacunarity), 裸地斑块破碎度(bare area fragmentation, D), 植被斑块上坡坡长(upslope side length, U), 以及裸地斑块连通度(Connectivity)。该序列指标不仅数量化了裸地或植被斑块即径流泥沙源汇区的分布范围, 同时数量化了源汇区之间的连接性, 建立了格局与过程的联系。

植被分布格局的变化不仅影响流域径流泥沙源汇区的产生, 同时还影响流域出口的洪峰流量。有关研究^[31]认为, 在调节河川径流量时森林植被在流域的空间分布格局具有重要作用, 当森林植被分布于流域上部时调节径流的作用最大, 而分布于流域下部时容易形成较大洪峰流量, 不利于发挥森林植被对径流的调节作用。当然, 即便森林分布格局较有利于调节洪峰流量, 河岸的植被分布对于土壤侵蚀防治具有重要作用。这在土层深厚的黄土高原地区尤为重要。通常, 即便流域完全覆盖有植被, 河岸坍塌和沟道侵蚀仍是侵蚀产沙的来源之一, 显著影响着不同径流泥沙观测的尺度转换。

目前, 很少研究将植被空间分布与地质-水文过程直接联系起来^[6], 耦合大尺度植被斑块时空变化与生态水文过程将有助于理解植被斑块及微地形对径流泥沙的影响^[32], 今后干旱半干旱地区植被与径流泥沙水文关系的研究应注重探讨植被分布格局对水文过程所起的影响作用^[33, 34]

1.4 造林、采伐等森林经营措施对流域径流泥沙水文响应的影响

造林、采伐等对产流产沙的影响研究早已为水文学家和生态学家所关注。自 1909 年第一个对比实验流域设置以后, 世界各国相继开展了一系列的实验流域观测^[2, 35], 随着对森林生态系统认识的提高, 至 20 世纪 60 年代研究已达繁盛时期, 研究内容由水量、水文循环变化扩展至养分循环等, 物理过程、生物过程及化学过程同时体现于其中。森林经营活动本身也属于干扰行为, 该类影响研究从宏观尺度上联系了植被变化与径流泥沙的关系, 因此有必要在此对其专门讨论。

造林采伐的影响研究多根据单个实验流域或对比实验流域观测结果探讨^[36-38]。Hibbert 于 1967 年曾根据世界各地 39 个实验流域的观测资料总结回顾了植被变化对流域产水量的影响研究。1982 年, Bosch^[36]另外增加了 55 个实验流域资料对 Hibbert 的评论进行了肯定及补充, 总体认为: 森林植被覆被减少, 流域产水量增加, 反之亦然。对于针叶树和桉树, 当植被覆被变化 10% 时, 流域产水量变化 40 mm, 对于落叶阔叶树产水量变化 25 mm, 而对于灌草则变化 10 mm。然而, Bosch 进一步指出当植被覆被变化少于 20% 时, 很难通过观测方法检测流域产水量变化。McMinn 等^[3]曾就此讨论认为, 既然零处理时影响效应为零, 逻辑上植被变化较小时应有一定的径流响应, 只是其响应的尺度小于观测尺度, 即流域水平。各国研究者对此有不同的认识^[4, 37]。Stdenick^[5]认为, 这主要与研究地点、树种类型、原有的植被覆盖以及观测误差有关。

国内关于森林植被变化与径流泥沙关系的研究起步较晚^[39, 40]。1978 年刘昌明^[40]对比分析了黄土高原林区与非林区径流量, 指出林区径流系数较非林区径流系数减少 30%~50%; 黄明斌^[42]比较了森林流域与非森林流域的径流变化, 发现森林流域汛期(6~9 月份)总径流量较非森林流域减少 7.1~8.9mm, 并指出森林植被对枯水期径流的调节作用非常有限; 王红闪^[43]根据森林流域与荒坡草地流域的对比观测, 发现 1956~2000 年 40a 来森林流域累积径流减少 37%。孙阁^[44]等认为森林植被恢复, 同原来的荒地, 坡耕地相比, 树木蒸腾增大, 总耗水量加大, 因此会降低河流总流量, 尤其是基流。采用陆地蒸发散模型对整个中国境内森林恢复对可能河流产水量减少进行了定量分析。研究发现森林完全恢复可降低流域产水量高达 20%~40%, 以北方干旱地区相对影响最大。但是, 该研究同时指出森林植被这种效果需要几年(南方)或几十年(北方)才能表现出来, 这与 Jackson^[45]等人的研究结果一致。由于各种条件的限制, 国内多数经验性研究并未严格按照对比实

验流域的方法,且缺乏长期的观测序列,研究结果严谨性较差。

造林、采伐等森林经营措施对流域产沙的影响长期以来也一直是流域管理中的主要问题之一。森林经营措施改变原有水量平衡,地下水发生变化。在不断上升的地下水位及空隙压力作用下,或是在腐烂的植被根系作用下,土壤团聚体内聚力减小,边坡稳定性下降,滑坡坍塌可能性增大,增加了侵蚀产沙的几率和来源^[46]。此外,由于植被变化引起流域产流变化,流域产沙也随之变化。Lewis等^[47]观测研究表明:由于径流量增加,流域产沙增加。Sidle等^[48]认为产沙量增加不仅与增加的径流量相关,而且随着渠道与坡面之间亚地表径流连接度增加,流域产沙量增加。

2 植被变化影响径流泥沙水文响应研究手段与方法

2.1 实验室模拟方法

植被变化影响径流泥沙水文响应具有不同的过程尺度。当过程尺度与观测尺度一致时研究结果较为准确,因此,不同的过程尺度研究应对应有不同的研究方法。对于微尺度的信息,如植被变化对截留率的影响、对枯落物水文作用的影响,以及对土壤可蚀性的影响等可采用室内实验模拟的方法,通过控制干扰因素以获得相关信息。室内实验室模拟方法虽然研究周期较短,干扰因素较少,但是难以代表野外的实际情形,室内得到的模拟结果往往理想化,很难用于解释野外复杂条件的情形,仍具有较多不确定性^[49]。

2.2 野外观测实验方法

坡面尺度或流域尺度的相关信息可采用野外观测实验方法。早期关于植被变化对流域水文影响的认识多采用“对比流域”或“单一流域”通过野外观测实验获得。相比较而言,“对比流域”的实验设置要求土壤、地质等条件比较一致,且对比实验流域方法能够较好地剔除气候因素的影响^[50,51],因此可直接将径流变化解释为植被变化的影响;而“单一实验流域”虽然土壤、地质等在观测前后两期并未发生变化,但不能保证流域在前后两期具有相似的气候条件,因此,根据单个实验流域观测数据分析时必须剔除不同气候因素的影响才可确定植被变化对流域径流的影响。

进行野外观测实验时通常结合采用水文测验方法、同位素水文学方法以及动力水文学方法,并有效结合坡面尺度与流域尺度,以流域尺度研究验证坡面尺度研究,从深层次认识植被变化影响径流泥沙的过程与机制^[52]。然而,野外观测实验方法研究结果虽然可代表野外复杂条件的情形,但其耗时较长,以森林经营措施对径流泥沙的影响研究为例,森林植被的更新及恢复往往需要十几年甚至几十年,且资金投入及人工投入较大,因此,野外实验观测的方法具有一定局限性。

2.3 水文模型模拟方法

水文模型的应用发展是森林水文学研究的必然结果。由最初的黑箱模型发展到集总式模型,并最终发展为分布式水文模型。目前虽然已存在有大量适于各尺度的基于物理过程的连续性的水力-土壤侵蚀模型,如,WEPP模型^[53],EUROSEM模型^[54],TOPMODEL^[55],RHESSys^[56],SHE^[57,58],等,但模型中对植被的表征或耦合过于简单,并未模拟由于生物及非生物因素引起的植被动态变化对径流泥沙水文过程的影响^[30],且模型很少考虑植被与水文过程的反馈作用^[59]。RHESSys模型以分布式的基于物理过程的方法模拟了流域水量平衡和植被生长,把植物的水文功能与植被的生长发育结合起来,但模型仅以林冠层代表植被,对于针叶林来说这足以说明问题,但大多数情况下林冠层和下木层之间存在有长期的动态平衡^①,模型对植被的耦合过于简单,且模型中联系植被生长与水文作用的植被指数仅包含叶面积指数LAI和根深^[60]。SHE模型采用概念较为简单的规则格网离散空间,且模型适宜的尺度范围较大,从30m²到500km²,但模型类似于RHESSys模型,仍然仅采用单层林冠层代表植被,且模型为商业性软件,应用具有一定局限性。DHVM模型对植被的描述有了进一步改进,除林冠层外增加了对下木层的耦合,模型类似于SHE模型,也采用规则格网离散空间,但这类模型的缺

① Watson F G R. Large scale, long term, physically based modelling of the effects of land cover change on forest water yield. Ph D dissertation, University of Melbourne, Australia, 1999, 9, 433 pp.

点在于不适于自然界中存在的异质性多尺度现象。目前虽然广泛存在有两类模型^a: 完全分布式模型(Fully distributed models, 如 SHE 模型、DHVI 模型) 和分布式函数模型(Distributed function models, 如 TOPMODEL、RHESSys 模型、新安江模型等), 但是 FDMs(Fully distributed models) 模型较为复杂, 模型实现具有较多不确定性, 而 DFMs(Distributed function models) 模型则较为简单化, 分布式函数的物理意义较不明确。因此, 现有水文模型有必要加强对植被与径流泥沙反馈系统的耦合, 同时进一步改进模型空间离散方法。

3 植被变化与径流泥沙研究的尺度问题

尺度上推并非在较大面积上运行小尺度模型, 通常从小区尺度上推至流域尺度或区域尺度时存在有不同的生物控制过程, 且各尺度间具有连续性, 因此尺度转换仍是该领域研究的主要问题。径流泥沙研究进行尺度上推需要系统地理理解植被与径流泥沙等水分养分之间的联系及反馈机制。不仅土壤前期含水量、地表状况等影响土壤侵蚀, 而且随着时间的转变, 地表植被在人为干扰或自身演替作用下不断发生变化, 这使得很难确立土壤侵蚀与气候、植被变化的相关关系, 有必要以动态系统的观点考虑时空交互影响的生态系统^[29]。随着近代生态学的发展, 逐渐提出了等级系统的概念^[61, 62]。由于大尺度出现有新的特征和限制条件, 不可能根据小尺度观测研究解释大尺度现象, 因此需要以等级系统的观点来联系不同尺度的观测研究^[32]。Kirkby 等^[29]曾采用 MEDALUS 模型, 以等级系统的理论详尽阐述了植被生长-土壤有机质-径流泥沙这一动态反馈系统在尺度上推过程中的重要性。

土壤侵蚀观测具有尺度依赖性, 由于植被斑块的对径流泥沙的阻截、吸收, 导致产流区连接中断, 很难将小区、坡面的观测结果上推至流域尺度。因此, 干旱半干旱地区要进行尺度上推, 还需要正确理解径流的非连续性以及地表的异质性^[63, 64]。Cammaraat^[11]采用等级系统的方法研究了植被与径流泥沙水文过程之间的动态联系, 结果表明: 除了以等级系统理论为基础外, 进行尺度上推时还需要考虑坡面尺度植被的非随机分布现象。当降雨强度大于植被吸水能力或裸地入渗率时, 裸地地表径流开始汇集、连接, 因此, 植被斑块的空间分布对于地表径流汇集具有决定作用。Cammaraa^[26]认为 3 个主要水文响应尺度, 即: 小区尺度、坡面尺度、流域尺度均具有不同的水文响应临界值, 并进一步指出: 小尺度只有当植被对径流的缓冲(即阻截、吸收)作用达一定程度时地表径流才能发生连接, 使径流产区不断扩大, 产生地表径流。这种观点部分类似于蓄满产流中变动源区的概念。Bergkamp^[32]针对 5 级不同尺度研究了植被与径流泥沙的相关关系, 结果表明坡面尺度的径流并不具连通性, 坡面产流与流域径流响应不具备相关性, 不能直接建立坡面入参与流域产流的相关关系, 流域径流通常主要来自于接近沟道的产流区, 只有当降水强度较大时流域径流来自于整个汇水区, 且主要为超渗产流。正确理解径流非连续性对于正确理解产流机制并有效进行尺度转化具有重要意义。

4 结语

植被变化来源于不同因素, 体现于不同尺度, 各尺度植被变化引起水文响应具有不同的主要控制过程(如图 1 所示)。以往虽然开展了大量以径流小区为单元关于植被变化对径流泥沙的相关研究, 但较为系统地多尺度植被变化与流域径流泥沙协同变化的研究仍然较少, 多以集中探讨某一过程尺度植被与水文的相关关系为主。对于微尺度, 研究者往往对比分析不同植被状况如: 不同树龄、不同树种、不同覆盖所产生的径流泥沙差异, 而较明确地对植被自身各生长阶段引起径流泥沙响应的研究则仍然较少。对于宏观尺度, 植被变化多集中于造林、采伐等森林经营措施的影响研究, 并形成较为独立的研究领域, 具备较为成熟的观测研究方法。宏观尺度上的植被变化同时还对应应有植被分布格局的变化, 然而, 有关植被分布格局的变化与流域径流泥沙的相关研究仍然较少。要确切理解生态系统中各组分于不同时空的相互作用, 需要以动态的等级系统的观点加以研究。

植被生长或植被演替由于植被生理结构变化, 生长耗水不同, 从而径流泥沙响应不同, 因此这类研究多着眼于生物过程, 以生理生态学的观点加以探讨; 而植被分布格局对水文过程的影响研究则应融合景观生态的

a. Watson FG R. Large scale, long tem, physically based modelling of the effects of land cover change on forest water yield. Ph D dissertation, University of Melbourne, Australia, 1999, 9, 433 pp

概念, 将景观分布格局与水文过程有机联合起来。Bahre^[65] 的研究表明: 野外调查由于涵盖的面积较小, 因此运用于大尺度具有一定限制; 而历史图片的比较也仅仅能提供植被变化的定性信息, 量化的信息较少。GIS 的发展及遥感技术的普遍应用为此类研究提供了较好的平台。然而, 若要更准确地分析探讨植被变化影响径流泥沙的水文响应, 仍需借助于分布式的物理模型。经验性的回归模型虽然较为快捷, 但由于各尺度间存在有径流的非连续性, 不能准确获得植被变化引起径流泥沙响应的物理机制。这就需要水文模型同时融合水文与景观生态的概念。有研究曾提出分布式水文模型建立过程中单元划分应以景观生态学为基础的重要性^[60]。此外, 植被生长变化与径流泥沙相互作用形成反馈系统。以往的水文模型通常仅简略地考虑植被冠层叶面积指数、根深等, 并未全面地反映植被生长对水文环境的影响, 如长时间尺度上植被生长影响土壤有机质并进而影响产流产沙, 因此, 水文模型的发展也应加强对植被生态信息的耦合。

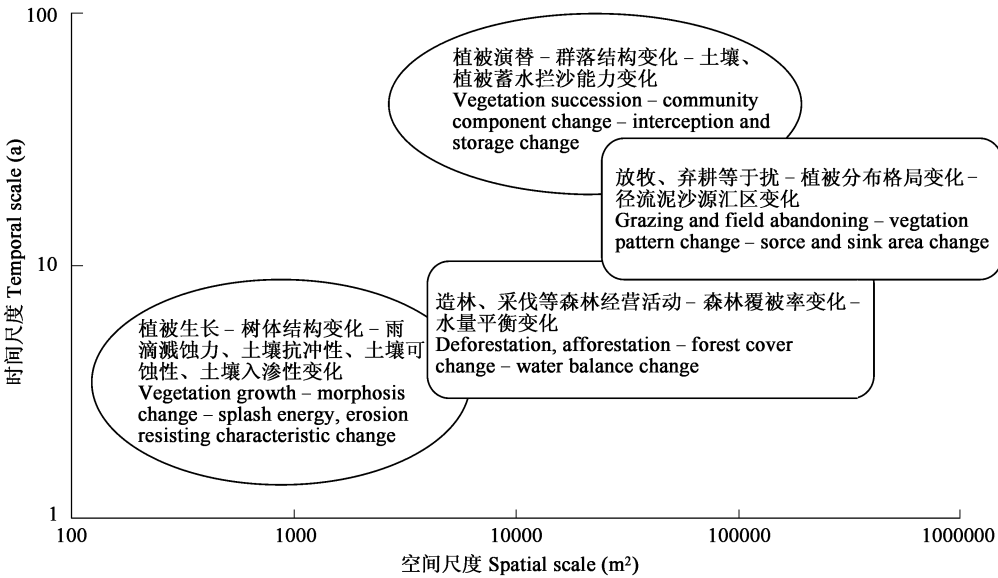


图 1 多尺度植被变化影响水文响应的主要控制过程

Fig. 1 Dominant hydrological response processes to vegetation change at multiple spatial-temporal scales

作为逐步的发展和完善, 水文模型由集总式发展为分布式, 将自然界存在的异质性问题进行模型整合。尽管将物理方程引入水文模型从机理上解释了水文循环过程, 但模型仍有待于进一步完善。不同尺度植被变化影响径流泥沙的主要控制过程不同, 不仅涉及景观生态过程, 同时涵盖了生理生态过程, 因此, 今后的植被—水文关系研究有必要将生态、水文与景观有机融合, 以景观生态的原理为基础, 并将植被的生理生长模型更为深入地融合进分布式水文模型, 以进一步改善模型预测效能, 深刻揭示植被变化与径流泥沙水文响应的内在机理。

References:

[1] Hudson N W. Soil Conservation. Dou B Z, Translate. Beijing: China Scientific Press, 1975. 2~ 3.

[2] Hibbert A R. Water yield changes after converting a forested catchment to grass. Water Resour. Res., 1969, 5: 634~ 640.

[3] McMin J W, Hewlett J D. First year water yield increase after forest cutting: an alternative model. J. For., 1975, 73: 654~ 655.

[4] Swank W T, Swift J L W, Douglass J E. Streamflow changes associated with forest cutting, species conversions, and natural disturbances. In: Swank W T and Crossley D A eds. Forest Hydrology and Ecology at Coweeta. Ecol. Stud., 1988, 66: 297~ 312.

[5] Stednick J D. Monitoring the effects of timber water yield harvest on annual. Journal of Hydrology, 1996, 176: 79~ 95.

[6] Imeson A C and Prinsen H A M. Vegetation patterns as biological indicators for identifying runoff and sediment source and sink areas for semi-arid landscapes in Spain. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2004, 104: 333~ 342.

[7] Cammeraat L H and Imeson A C. Deriving indicators of soil degradation from soil aggregation studies in southeastern Spain and southern France. Geomorphology, 1998, 23: 307~ 321.

[8] Tongway D and Hindley N. Assessing and monitoring desertification with soil indicators. In: Arnalds O and Archer S Eds. Advances in Vegetation Science

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

- 19: Rangeland Desertification. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1999. 89~ 98.
- [9] Sanchez G and Puigdefabregas J. Interactions of plant growth and sediment movement on slopes in a semi-arid environment. *Geomorphology*, 1994, 9: 243~ 260.
- [10] Bochet E, Rubio J L, Poesen J. Relative efficiency of three representative matorral species in reducing water erosion at the microscale in a semi-arid climate (Valencia, Spain). *Geomorphology*, 1998, 23: 139~ 150.
- [11] Cammeraat L H, Imeson A C. The evolution and significance of soil-vegetation patterns following land abandonment and fire in Spain. *Catena*, 1999, 37: 107~ 127.
- [12] Dawes W R, Zhang L, Hatton T J, *et al.* Evaluation of a distributed parameter eco-hydrological model (TOPOG-IRM) on a small cropping rotation catchment. *J Hydrol*, 1997, 191: 64~ 86.
- [13] Zhang Z Q, Yu X X, Zhao Y T, *et al.* advances in researches on the effect of forest on hydrological process. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(1): 113~ 116.
- [14] Hou X L, Du C X. Runoff and sediment yield analysis on plot scale with different vegetation. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1985, 5 (6): 35~ 37.
- [15] Zhang Q C, Liu B Y, Zhai G. Review on relationship between vegetation and soil and water loss. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, 9(4): 96~ 101.
- [16] Wang H S, Liu G B. Analyses on vegetation structures and their controlling soil erosion. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1999, 13(2): 62~ 68.
- [17] Chen Y Z. The source of coarse silt and mechanism of sediment yield. Beijing: Meteorological Press, 1989.
- [18] Thurow T L, Blackburn W H, Taylor C A. Infiltration and interrill erosion responses to selected livestock grazing strategies, Edwards Plateau, Texas. *Journal of Range Management*, 1988, 41: 296~ 302.
- [19] Thurow T L. Hydrology and erosion. In: Heitschmidt R K and Stuth J W eds. *Grazing management: an ecological perspective*. Timber Press Inc., Portland, OR, 1991. 141~ 160.
- [20] Pierson F B, Carlson D H, Spaeth K E. A process based hydrology submodel dynamically linked to the plant component of the simulation of production and utilization on rangelands SPUR model. *Ecological Modeling*, 2001, 141: 241~ 260.
- [21] Wood M K, Blackburn W H. Sediment production as influenced by livestock grazing on the Texas Rolling Plains. *Journal of Range Management*, 1981, 34: 228~ 231.
- [22] Blackburn W H. Factors influencing infiltration and sediment production of semiarid rangelands in Nevada. *Water Resources Research*, 1975, 11: 929~ 937.
- [23] Thurow T L, Blackburn W H, Taylor C A. Hydrologic characteristics of vegetation types as affected by livestock grazing systems, Edwards Plateau, Texas. *Journal of Range Management*, 1986, 39: 505~ 509.
- [24] Liu L H, Liu W Y. Comparison of benefits of soil and water conservation for different vegetation community in mountain area in Yunnan. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1990, 4(1): 36~ 42.
- [25] Juan B Gallego Fernandez M, Rosario Garc a Mora and Francisco Garc a Novo. Vegetation dynamics of Mediterranean shrublands in former cultural landscape at Grazalema Mountains, South Spain. *Plant Ecology*, 2004, 172: 83~ 94.
- [26] Cammeraat L H. Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in southeast Spain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 104: 317~ 332.
- [27] Puigdefabregas J, Sanchez G. Geomorphological implications of vegetation patchiness on semi-arid slopes. In: Anderson M G and Brooks S M eds. *Advances in Hillslope Processes*. Wiley, London, 1996. 1027~ 1060.
- [28] Mulligan M. Modelling the complexity of land surface response to climatic variability in Mediterranean environments. In: Anderson M G and Brooks S M eds. *Advances in Hillslope Processes*. Wiley, London, 1996. 1099~ 1150.
- [29] Kirkby M J, Imeson A C and Bergkamp G. Scaling up processes and models from the field plot to the watershed and regional areas. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, 51(5): 391~ 396.
- [30] Ludwig J A, Tongway D J and Marsden S G. Stripes, strands or stipples: modelling the influence of three landscape banding patterns on resource capture and productivity in semi-arid woodlands, Australia. *Catena*, 1999, 37: 257~ 273.
- [31] Ma X H. *Forest Hydrology*. Beijing: China Forestry Publication House, 1993. 251~ 252.
- [32] Bergkamp G. A hierarchical view of the interactions of runoff and infiltration with vegetation and microtopography in semiarid shrublands. *Catena*, 1998, 33: 201~ 220.
- [33] Wilcox R K D, Wilcox B P, *et al.* Runoff and Erosion in a Pinon-Juniper Woodland: Influence of Vegetation Patches. *Soil Science*, 1999, 63(6): 1869~ 1879.
- [34] Wilcox B, Breshears D D, Allen C D. Ecohydrology of a Resource-Conserving Semiarid Woodland: Effects of Scale and Disturbance. *Ecological Monographs*, 2003, 73(2): 223~ 239.
- [35] Meginnis H G. Increasing water yields by cutting forest vegetation. IAHS Publ. No. 48, IAHS, 1959. 59~ 68.
- [36] Bosch J M, Hewlett J D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 1982, 55: 3~ 23.
- [37] Hambeck J W, Adams M B, Corbett E S, *et al.* Long-term impacts of forest treatments on water yield: a summary for northeastern United States. *Journal of Hydrology*, 1993, 150: 323~ 344.
- [38] Brown A E, Zhang L, McMahon T A, *et al.* A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 2005, 310: 28~ 61.
- [39] Liu S R, *et al.* *Ecohydrologic Characteristics of Forest Ecosystems in China*. Beijing: China Forestry Publication House, 1996.
- [40] Yu X. Forest hydrologic research in China. *Journal of Hydrology*, 1991, 122, 23~ 31.
- [41] Liu C M and Zhong J X. The influence of forest cover upon annual runoff in the Loess Plateau of China. *Acta Geographica Sinica*, 1978, 33(2), 112~ 126.

- [42] Huang M B and Liu X Z. Regulation effect of forest vegetation on watershed runoff in the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(9): 1057~ 1060.
- [43] Wang H S, Huang M B and Zhang L. Impacts of re-vegetation on water cycle in a small watershed of the Loess Plateau. *Journal of Natural Resource*, 2004, 19(3): 344~ 350.
- [44] Sun G, Zhou G Y, Zhang Z Q, *et al.* Potential Water Yield Reduction due to Forestation across China. *Journal of Hydrology*, 2006.
- [45] Jackson R B, Jobbagy E G, Avissar R, *et al.* Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science*, 2005, 1944~ 1947.
- [46] Ziemer R R. Roots and stability of forested slopes. *International Association of Hydrological Science*. London UK., 1981. 343~ 357.
- [47] Lewis J, Mori S R, Keppeler E T, *et al.* Impacts of logging on storm peak flows, flow volumes and suspended sediment loads in Casper Creek, California. In: Wigmosta M S and Burges S J eds. *Land Use and Watersheds: Human influence on Hydrology and Geomorphology in urban and Forest Areas*. American Geophysical Union, Washington D. C., 85~ 126.
- [48] Sidle R C, Tsuboyama Y, Noguchi S, *et al.* Streamflow generation in steep headwaters: A linked Hydro-Geomorphic Paradigm. *Hydrological Processes*, 2000(14): 3369~ 385.
- [49] Chen J F and Li X B. The impact of forest change on watershed hydrology — discussing some controversies on forest hydrology. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 474~ 480.
- [50] Bari M A, Smith N, Ruprecht J K, *et al.* Changes in streamflow components following logging and regeneration in the southern forest of Western Australia. *Hydrological Processes*, 1996, 10 (3): 447~ 461.
- [51] Wang S P, Zhang Z Q, Sun G, *et al.* Effects of land use change on hydrological dynamics at watershed scale in the Loess Plateau. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(1), 48~ 54.
- [52] Zhang Z Q, Wang L X, Yu X X. Impacts of forest vegetation on runoff generation mechanisms: a review. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(1): 79 ~ 84.
- [53] Foster G R, Lane L J. User requirements: USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP). NSERL Report No. 1, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, W. Lafayette, IN., 1987.
- [54] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, *et al.* The European soil erosion model (EUROSEM): a process-based approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, 23: 527~ 544.
- [55] Beven K J, Kirkby M J, Schofield N, *et al.* Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three U. K. catchments. *Journal of Hydrology*, 1984, 69: 119~ 143.
- [56] Mackay D S, Band L E. Forest ecosystem processes at the watershed scale: Dynamic coupling of distributed hydrology and canopy growth. *Hydrological Processes*, 1997, 11: 1197~ 1217.
- [57] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, *et al.* An introduction to the European Hydrological System—Système Hydrologique Européen, SHE 1. History and philosophy of a physically-based distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 1986, 87: 45~ 59.
- [58] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, *et al.* An introduction to the European Hydrological System—Système Hydrologique Européen, SHE 2. Structure of a physically-based distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 1986, 87: 61~ 77.
- [59] Pilgrim D H, Chapman T G, Doran D G. Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions. *Journal of Hydrological Sciences*, 1988, 33: 379~ 400.
- [60] Yu P T. Application of physically-based distributed models in forest hydrology. *Forest Research*, 2000, 13(4): 431~ 438.
- [61] Allen T F H, Star T B. *Hierarchy, Perspectives for Ecological Complexity*. Chicago: Chicago Press, 1982. 310.
- [62] O'Neill R V, DeAngelis D L, Waide J B, *et al.* *A Hierarchical Concept of Ecosystems*. Princeton University Press, Princeton, NJ. 1986, 253.
- [63] Yair A, Lavee H. Runoff generation in arid and semi-arid zones. In: Anderson M G and Burt T P eds. *Hydrological Forecasting*. Wiley, Chichester. 1985. 183~ 220.
- [64] De Boer D H, Campbell I A. Spatial scale dependence of sediment dynamics in a semi-arid badland drainage basin. *Catena*, 1989, 16: 277~ 290.
- [65] Bahre C J. *Legacy of Change: historic human impact on vegetation in the Arizona borderlands*. University of Arizona Press, Tucson, AZ, 1991.

参考文献:

- [1] 哈德逊 N W. 奚葆璋译. 土壤保持. 北京: 科学出版社, 1975. 2~ 3.
- [13] 张志强, 余新晓, 赵玉涛, 等. 森林对水文过程影响研究进展. *应用生态学报*, 2003, 14(1): 113~ 116.
- [14] 侯喜禄, 杜呈祥. 不同植被类型小区径流泥沙观测实验. *水土保持通报*, 1985, 5(6): 35~ 37.
- [15] 张清春, 刘宝元, 翟刚. 植被与水土流失研究综述. *水土保持研究*, 2002, 9(4): 96~ 101.
- [16] 王晗生, 刘国彬. 植被结构及其防止土壤侵蚀作用分析. *干旱区资源与环境*, 1999, 13(2): 62~ 68.
- [17] 陈永宗. 黄河粗泥沙来源及侵蚀产沙机理研究文集. 北京: 气象出版社, 1989.
- [24] 刘伦辉, 刘文耀. 滇中山地主要植物群落水土保持效益比较. *水土保持学报*, 1990, 4(1): 36~ 42.
- [31] 马雪华. 森林水文学. 北京: 中国林业出版社, 1993. 251~ 252.
- [39] 刘世荣, 等, 主编. 中国森林生态系统水文生态功能规律. 中国林业出版社, 1996.
- [41] 刘昌明, 钟骏襄. 黄土高原森林对年径流影响的初步分析. *地理学报*, 1978, 33(2): 112~ 126.
- [42] 黄明斌, 刘贤赵. 黄土高原森林植被对流域径流的调节作用. *应用生态学报*, 2002, 13(9): 1057~ 1060.
- [43] 王红闪, 黄明斌, 张轶. 黄土高原植被重建对小流域水循环的影响. *自然资源学报*, 2004, 19(3): 344~ 350.
- [49] 陈军峰, 李秀彬. 森林植被变化对流域水文影响的争论. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 474~ 480.
- [51] 王盛萍, 张志强, 孙阁, 等. 黄土高原流域土地利用变化水文动态响应——以吕二沟流域为例. *北京林业大学学报*, 2006, 28(1): 48~ 54.
- [52] 张志强, 王礼先, 余新晓. 森林植被影响径流形成机制研究进展. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 79~ 84.
- [60] 于澎涛. 分布式水文模型在森林水文学中的作用. *林业科学研究*, 2000, 13(4): 431~ 438.