

黄土高原防护林建设的恢复生态学与生态水文学基础

王盛萍¹, 张志强^{2,*}, 张化永¹, 孙 阁³

(1. 华北电力大学能源与环境研究中心, 北京 102206; 2. 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; 3. Southern Global Change Program, USDA Forest Service, Raleigh, NC 27606, USA)

摘要:以控制土壤侵蚀和提高土地生产力为主要目标的防护林建设是黄土高原植被建设与生态恢复的主体。在对国内外防护林建设研究进行回顾的基础上,从恢复生态学与生态水文学视角探讨了我国西北黄土高原地区防护林建设目标、防护林建设研究尺度、防护林建设基础理论等,并提出今后黄土高原防护林建设研究方向,其目的在于,通过探讨进一步明确当前黄土高原防护林建设的问题,为该区防护林体系建设提供指导依据。防护林建设除了要达到侵蚀防治等功能的正常发挥外,其终极目标应强调水-沙平衡这一生态水文学目标的实现。防护林建设需要从不同尺度予以理解,除林分尺度的结构优化与功能调控技术以及小流域尺度空间对位配置技术外,区域尺度地带性植被和适宜覆盖率的确定也应为防护林建设的内容。为实现防护林建设的生态水文学目标,防护林建设应遵循恢复生态学中的水分限制因子理论、生态适宜性理论、生物多样性理论以及群落演替理论,这就要求防护林建设总体应以林-水平衡为核心,在实现区域植被地带性及微观尺度适地适树的同时,考虑次生林主要树种的引入,以促进防护林建设生物多样性及群落顺行演替。总体来看,黄土高原防护林建设应基于恢复生态学与生态水文学加强以下研究:(1)针对气候变化,加强防护林建设气候变化适应性评价研究,建立适应性防护林可持续经营管理理论与技术体系;(2)针对立地条件空间异质性,加强高分辨率植被恢复适宜性评价研究,建立定量的植被恢复适地适树适群落理论体系;(3)以恢复生态学原理为指导,加强潜在植被空间分布格局的复原与预测研究,建立近自然防护林建设植被恢复模式;(4)针对全球气候变化与资源性缺水问题,加强基于物理过程分布式生态水文模型的模型模拟研究,为防护林体系建设中植被空间分布、结构组成与规模提供决策依据。

关键词:防护林建设;恢复生态学;生态水文学;黄土高原

Restoration ecology and eco-hydrology sciences: the basis for construction of protection forests on the Loess Plateau, China

WANG Shengping¹, ZHANG Zhiqiang^{2,*}, ZHANG Huayong¹, SUN Ge³

1 Energy and Environmental Research Center, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

2 Key Lab of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 Southern Global Change Program, USDA Forest Service, Raleigh, NC 27606, USA

Abstract: To combat severe soil erosion and improve the land productivity, construction of protection forests has been widely implemented as one of the key ecological restoration efforts on the Loess Plateau in Northwestern China. After giving a brief introduction of the concept of protection forests defined by the various researchers, several issues with respect to the goal of protection forests, the scales and the principles for developing protection forests were examined from the viewpoints of restoration ecology and eco-hydrology. A few recommendations were proposed to provide the theoretical foundations for construction of protection forests. We argue that, in addition to soil erosion control, the ultimate of protection forests in the Loess area should serve both water regulation and erosion control. We should recognize the hierarchical system of protection forests. In addition to the structural-optimization techniques at the stand level and the spatial arrangements measures at the watershed level, determination of both zonal vegetation types and the coverage on the regional scale should be considered in

基金项目:“十一五”林业科技支撑计划资助项目(2006BAD03A0202);华北电力大学博士学位教师科研基金资助项目

收稿日期:2009-08-04; **修订日期:**2010-02-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhqzhang@bjfu.edu.cn

designing protection forests. To succeed in constructing protection forests and fulfilling the established targets, several theories should be followed in practice, including the principle of water balance, the theory of ecological suitability, the biological diversity, and the theory of ecosystem regeneration and succession. Construction of protection forests should not alter the balance of water availability and tree growth requirement. Dominant tree species of secondary forests should be encouraged to enhance forest succession and bio-diversity when implementing the conventional principle of “tree and site match”.

We conclude that the following four key aspects should be reinforced: (1) evaluation of the vulnerability of protection forests, and developing adaptation strategies for managing protection forests under a changing climate and variability; (2) implementation of the principle of “tree-site match” by assessment of suitability of reforestation at high spatial and temporal resolution based on the interactive relations between soil, hydrology, vegetation, and climate; (3) predicting the spatial distribution of potential vegetation of the loess area using restoration ecology theories and constructing the protection forests with the pattern of close-to-nature to restore the vegetation of the Loess area; (4) understanding the hydrological responses of protection forests to the change in vegetation patterns, species composition, as well as coverage using physically-based distributed eco-hydrological models; developing theories for forest restoration design on forest structure and spatial distributions of protection forests.

Key Words: construction of protection forests; restoration ecology; eco-hydrology; the Loess Plateau

黄土高原长期以来水资源短缺,土壤侵蚀严重。为有效缓解恶劣的生态环境,植被建设成为黄土高原生态恢复的主要手段。“三北防护林建设”和“退耕还林还草”等国家重点生态林业工程先后实施,大量研究相继开展,其中,重要的应用研究主要包括:黄土高原防护林体系建设立地类型划分与适地适树研究^[1-2],黄土高原生态经济型防护林体系建设技术与示范^[3-4],黄土高原防护林体系空间配置与林分结构优化技术研究^[5-6]等。在开展防护林建设生态效益评价研究的同时,黄土高原造林水分关系是整个黄土高原森林植被恢复中至关重要的研究内容。造林后土壤干化,进而引起“小老树”、“低产低效林”等问题引起社会各界对黄土高原造林可行性的质疑^[7]。如何开展合理科学的黄土高原防护林建设,在理论与应用上急需探讨或回答哪些问题等无疑显得十分重要的。本文基于恢复生态学与生态水文学,就黄土高原防护林建设的生态学目标、防护林建设研究的尺度、防护林建设应基于的恢复生态学理论等进行了深入探讨,并就今后如何加强黄土高原防护林建设以实现生态水文学等的研究进行了阐述,以期为该区植被恢复与生态重建提供参考。

1 黄土高原防护林建设的生态水文学目标

防护林指具有目标防护(如:防止雪崩、泥石流、干旱风等)或直接防护功能的森林生态系统^[8-9]。防护林同时应具备立地防护功能以及游憩、固碳、生物多样性保护等功能^[10]。奥地利、瑞士等欧洲国家为有效防治阿尔卑斯山区雪崩、泥石流、滚石等自然灾害,多致力于探讨防护林防护功能的模拟评价^[11],以及防护林体系构建与管理的理念与方法^[9,12];为有效防治土壤侵蚀、保护水质等,日本二战以后对防护林的保护及研究亦迅猛增长,进入 20 世纪 90 年代,防护林的森林游憩功能同样引起了日本学者的关注^[13];区别于上述研究,俄罗斯等多集中于农田防护林研究,通过探讨防护林结构以改善系统水热及能量平衡,从而促进农业生产率^[14]。

黄土高原为我国干旱半干旱区域,过度放牧及滥砍滥伐导致植被退化,土壤侵蚀严重,长期以来立地防护功能的发挥,即立地土壤侵蚀的有效控制是黄土高原防护林体系的主要防护功能。随着气候干暖化趋势的日趋升温,水文水资源问题同样制约了黄土高原生态恢复的进程,植被建设与区域水文水资源关系再次引起学者关注。虽然森林经营管理对于重现期为 5—10a 的洪水具有一定调节作用,但其同时影响了流域径流总量,且森林经营管理对于中、大洪水作用并不显著^[15],这意味着中、大洪水引起的土壤侵蚀仍然不可避免。因此,防护林建设不应过于夸大其对流域侵蚀防治的作用,而应基于对防护林植被如何影响流域径流、泥沙等科学认识,寻找可有效调和流域径流、泥沙的防护林体系空间配置模式及相关技术措施。从这一意义上说,防护林

体系的建立不应仅仅以以往侵蚀防治为目标向导,黄土高原防护林建设目标整体应体现植被对径流泥沙的平衡与调控,从生态水文学角度开展区域防护林建设。因此,黄土高原防护林体系的建立应基于生态水文学的目标而建立。

2 黄土高原防护林建设的研究尺度

针对如何建设防护林以恢复区域生态学学者进行了大量探讨。其中,防护林空间配置是防护林研究的一项重要内容^[6-7]。按不同立地特征、植被分布特征、水分/养分特征提出的防护林体系水平布局设计、立体空间布局设计,以及按流域不同地貌部位、不同坡度等提出了黄土残塬沟壑区小流域防护林配置模式等为防护林空间配置提供了重要参考。除人工植被建设以外,生物谷坊、土谷坊、封禁措施等也作为防护林建设的一部分纳入防护林配置模式。然而,以往防护林建设研究多集中于空间配置模式和水平配置模式等方面。防护林体系作为完整的生态系统,其建设与经营管理应以生态系统原理为基础,仅探讨林分尺度防护林结构特征或仅探讨流域尺度空间配置方式对于防护林体系的经营管理具有很大局限性^[12],也将不利于区域退化生态系统的生态恢复。不仅林分结构特征影响防护林功能的发挥,同时生态系统各种结构性特征,如:气候、基岩、土壤等不同很可能引起不同区域林分植被组成表现不同,苔藓、地衣等也将影响某些树种种苗的成活,从而影响防护林功能的正常发挥。因此,要使黄土高原退化生态系统得到有效恢复,防护林建设应从不同尺度予以理解(图1),而非仅局限于林种配置或树种配置。

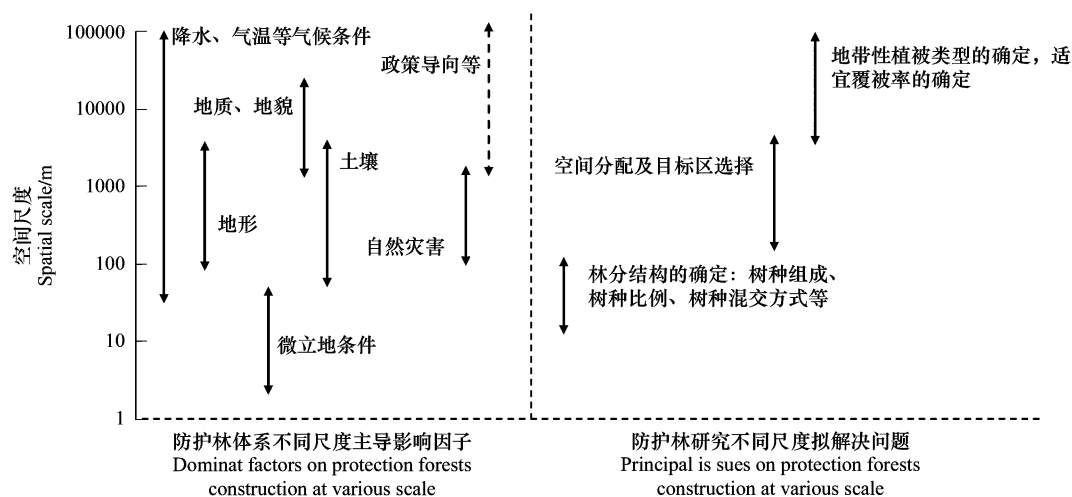


图1 防护林建设生态恢复不同尺度主导影响因子及拟解决问题

Fig. 1 The dominant factors and the principal issues on protection forests construction at various scale

区域之间表现有不同的地质地貌条件、气候条件,以及其它资源限制、政策导向等。相对于生态系统其它各个过程尺度,区域尺度植被主要受降水、气温等气候条件影响控制,不同降水往往导致区域呈现不同的地带性植被特征,并一定程度影响植被覆被状况,因此,区域尺度防护林建设总体应确定区域植被类型(林、灌、草)特征,并依据政策导向、资源限制等确定一定的植被覆被率。以往关于植被覆被率的研究^[16-17]以及地带性植被的探讨^[18]对于区域防护林建设具有重要意义。相关研究曾提出区域尺度植被覆被率研究是防护林体系配置研究的组成部分^[19]。

与宏观尺度相比,流域或坡面尺度防护林建设其关键应强调植被空间分布格局的确定。即便同一地貌,流域内不同坡面、不同坡型、不同坡位等往往存在光热条件、水分/养分条件等差异。以往防护林水平配置研究亦提出流域空间对位配置等概念^[5-6],但以地貌单元为基础简单定性的空间配置弱化了对流域生境空间异质性的反映,缺乏具有高分辨率的、有效耦合地形、地貌、土壤、水热条件等空间信息的有效支持,植被建设往往因不当的立地/生境适宜性评价导致成活率低等现象。因此,基于GIS识别并确定流域内适宜的植被空间分布是流域尺度防护林建设生态恢复的关键。而对于林分尺度,因林分内地形、土壤等相对均一,林分结构主

要受种间对水分/养分资源竞争的主导控制,因此,调控或确定林分树种组成结构、组成比例、组成方式等是林分尺度防护林建设的主要内容,以往防护林建设中立体配置研究即反映了林分尺度防护林建设的内容。

3 黄土高原防护林建设的恢复生态学基础

3.1 限制因子理论

黄土高原防护林建设受多种因素影响,水分稀缺是影响其生态恢复的关键限制因素。区域多年平均降水量 200—600 mm,多以暴雨产生,约 50%—80% 集中于 7—9 月份。以甘肃天水为例,其多年平均年降水 573 mm,但 80% 的降雨多集中在 6 月份至 9 月份,年降水仅约 5% (29 mm) 的降雨能以径流形式产生^[20-21]。降水区域土壤唯一补给来源,虽然部分降水可蓄存于土壤,但强烈的蒸发潜力(潜在蒸发散可达 1729 mm)导致流域蒸发散损失较大、土壤水分亏缺,区域间差异显著^[22]。以陕北黄土高原为例,其干旱季节 5、6 月份土壤水分亏缺,1 m 土壤层含水量分别为洛川 15.16%,淳化 13.55%,米脂和吴旗仅为 8.46% 和 6.34%^[23]。水分稀缺严重制约区域生态恢复,因此,从恢复生态学理论看,黄土高原防护林建设关键限制因子为水分。

长期以来,学者一直致力于探讨水分限制对黄土高原植被恢复的重要影响^[24-25]。其中“生物-气候”区域划分^[26]、植被地带性特征^[18]、植被-降水关系临界现象^[27]等研究充分反映了水分空间分异规律、水分可获性对于黄土高原植被建设的重要性。为达到建设稳定林分的目标,学者还就防护林林分结构空间配置技术等进行研究^[25, 28],乡土树种应用、林分密度与树种比例等人工调控技术、乔灌草种间搭配技术以及封山育林等为防护林建设生态恢复提供了有效的技术支持。此外,水平沟、鱼鳞坑等截流集水措施为改善防护林体系水分环境提供了重要的非生物技术措施。然而,黄土高原植被建设进程中“土壤干层”、“小老树”、“低产林”等现象仍然普遍存在。除经营管理措施不当外,于防护林生态恢复过程中水分平衡原理仍未能有效体现。在林分尺度上,植被结构配置与立地土壤水分承载力应相一致;在区域尺度上,防护林建设应遵从水热组合,特别是降水起决定性作用的植被地带性规律,避免大面积推进乔木林建设;在流域尺度上,则有必要以水量平衡为前提,充分探讨具有高分辨率,且有效融合地形、土壤、水分、光照等的生境适宜性或立地适宜性评价,为流域防护林建设目标单元的确定提供定量依据。基于土壤水平衡的林草覆被率研究^[29]以及基于水分平衡的流域防护林体系空间配置模式研究^[5]等体现了林-水平衡在防护林生态恢复中的核心地位。

3.2 生态适宜性理论与生物多样性理论

防护林建设除应遵循水分限制等限制因素理论外,同时必须遵循生态适宜性理论。“适地适树”反映了恢复生态学所强调的生态适宜性理论,即适宜物种引入适宜环境。无论方法途径如何,“适地适树”的实现应基于恰当的适宜性评价。尽管传统立地分类等级系统理论以及分类依据的提出均可用于指导立地适宜性评价,但是,基于传统立地分类评价往往未考虑群落/林分发育与生长的动态适宜性。针对广泛存在的“低产林”、“小老树”等现象,部分学者认为除评价树种生态学特性、成活成林情况,还必须评价林分的稳定性及其防护效益、经济效益^[30]。有学者并基于植物群落学原理提出“适地适林”的概念^[31],即:树种选择除考虑树种生态学特性,同时必须从群落结构考虑其种间关系。可以认为,“适地适林”概念的提出以及对于“适地适树”评价标准的认识基本上反映了适宜性评价耦合立地-植被动态响应关系的必要性。

“适地适树”的实施不应违背植被地带性规律,并且应保证对流域空间异质性的有效反映。实际上,在植被建设过程中,所有区域大面积营造乔木林在客观上已违背了植被地带性规律。往往因忽略区域尺度降水条件的限制性而导致不恰当的适宜性评价。这就要求防护林建设生态适宜性评价有必要以降水作为高一级分类依据。此外,从微尺度看,传统的立地分类的判别并不有效保证防护林建设局地土地单元的生境适宜性。尽管以往各种防护林配置模式的提出亦基于不同的立地类型确定,但强烈的空间异质性使得局地土壤因不当的生境适宜性评价导致低产林、小老树等问题仍然不可避免。因此,要真正实现适地适树,不仅有必要纳入高一级评价依据识别地带性植被空间分布规律,同时有必要基于高分辨率的空间信息探询植被与环境关系,进一步辨别目标单元立地适宜性的程度以及主要限制因素。

“适地适树”的实施或生态适宜性理论同时应保证生物多样性。尽管早期有学者曾对黄土高原地区常见

造林树种适宜性进行探讨^[32],并有学者针对不同树种或物种进行了适宜性分区及预测^[33-34]。但是,如何将植被适宜性研究真正意义应用于指导建设具有生物多样性特征的防护林研究仍然较为薄弱。较多研究进行树种选择时仍然仅能局限于“林”、“灌”、“草”等分类的探讨,对于下一级树种的具体选择仍缺乏一定的探索。乡土树种虽然表现有相对较强的生态适宜性,但过度依赖乡土树种对生态恢复具有一定的局限性。乡土树种并非均适宜成林^[31],营造单一人工刺槐林或油松林等并不符合恢复生态学所强调的生物多样性理论以及异质性理论^[35]。因此,从林分尺度看,林分树种的选择及空间搭配有必要引入混交树种、营建具有复层结构的防护林空间配置结构;从景观尺度看,防护林建设有必要保留林带、河岸植被带等作为基本特征,以保证景观的连通性、促进防护林体系生物多样性的发展。

3.3 群落演替理论

群落演替理论是退化生态系统恢复重建的重要基础理论。为使黄土高原退化生态系统恢复生物生产力、提高生物多样性,并保证系统结构与功能的正常发挥,黄土高原防护林建设有必要以群落演替理论为基础。封禁措施作为黄土高原防护林体系的一部分,正好反映了利用自然力促进植被恢复的自然演替。然而,仅仅依靠封禁的技术措施实现防护林建设漫长且无现实意义。实际上,黄土高原防护林建设的主体仍在于人工林建设。与次生植被相比,人工林调节水文循环和作用相对薄弱。基于单纯的人工林建设很难实现防护林体系的生态水文学目标,防护林建设需要较长时间来实现退化生态系统的恢复。这就要求人工林植被建设过程中有必要引入处于顺行演替前一阶段的某些物种,从而加速演替进程。山杨、栎类等作为黄土高原区域常见次生林主要树种,可考虑引入人工林植被营建过程以促进其顺行演替。

4 黄土高原防护林建设研究展望

4.1 气候变化影响研究与高分辨率适宜性评价

生态适宜性理论强调防护林建设时应注重气候所决定的植被地带性分布。随着全球气候的变化,植被地带性分布必将发生迁移与转变。“适应性经营管理”理念的提出可以认为对生态恢复提出了新的挑战。由此,恢复生态学中亦提出适应性恢复的基础理论^[35],这就要求防护林建设研究有必要考虑气候变化影响并提出适应性调整措施。气候变化影响研究是未来防护林建设研究的一项重要内容。日本、韩国等为有效推进其林业建设,已将气候变化影响研究纳入其未来林业建设研究方向^[13,36]。立地土壤和植被作为森林可持续发展的根本,更易遭受气候变化影响^[37]。正如不同气候带所揭示反映的:立地土壤和植被将随气候变迁而发生变化。因此,在未来气候变化条件下,要有效建设防护林以恢复区域生态并达到可持续发展,有必要探询防护林体系立地特征的气候响应变化,不仅要辨析对气候变化能作出灵敏响应的标识性林地土壤参数,而且要探讨立地特征潜在响应变化范围;此外,要探询植物物种的气候变化响应,辨析对气候变化响应灵敏的主要物种及其变化特征,为防护林建设及其适应性经营管理提供物种选择依据;并探询气候变化影响的防护林体系水分、能量等循环特征的影响及改变,为防护林建设及适应性经营管理调控措施的选择布设提供依据。

生态适宜性理论同时要求防护林建设考虑微尺度的空间异质性。以往的防护林空间对位配置尽管强调立地分类,但经验性立地判别以及宏观对位配置并未对流域广泛存在的空间异质进行充分的考虑,仍然难以突破水分限制特征。有研究对县域退耕还林还草进行空间决策探讨,确定了还林还草区域的空间分布^[38];并有研究根据降雨、气温、地形、土壤等因子,对黄土高原多沙粗沙区进行了不同树种生境适宜性评价,生成植被适宜性分布图^[33-34];但是,基于高分辨率的、有效整合空间异质性的适宜性评价研究仍较少。只有有效区别目标单元间生境适宜性程度以及差异才能真正保证“适地适树适群落”,也才能为植被建设目标区域的选择或空间分配提供理论依据,从而有效保障防护林建设生态恢复。因此,防护林建设研究有必要加强基于高分辨率的适宜性评价及目标区域辨识研究。

4.2 植被潜在分布格局的复原与预测研究

潜在植被分布格局不受人干扰,反映了在现有环境条件下与立地达到的某种平衡演替终态。通过潜在植被分布预测研究,可模拟产生与生物生境相适应的潜在植被分布图,对于近自然的防护林建设植被恢复模

式等具有重要指导意义。传统植被数量分类可有效揭示种群、群落与环境因子相关关系^[39],为植被分布预测中种群群落与环境变量关系的建立提供依据。因此,国内许多学者采用主分量分析(PCA)、主坐标分析(PCOA)、对应分析(CA)、除趋势对应分析(DCA)、典范对应分析(CCA)以及除趋势典范对应分析(DCCA)等探讨黄土高原地区植被分布与环境变化关系^[40-41]。但是,根据植被-环境关系来模拟预测植被潜在分布格局,对植被潜在分布格局进行复原与预测研究仍很薄弱。除布尔运算法以外,分类回归树模型、神经网络、逻辑斯蒂回归模型、贝叶斯方法、判别分析、广义线性模型和广义相加模型等参数模型和机器学习模型均可应用于植被预测研究中^[8, 34, 42-43]。在构建群落-环境关系时,环境因子变量如:地形、土壤、植被、地貌等也逐渐取代气候因子被广泛应用于相关研究。需要进一步指出的是,以往已开展的研究多集中于探讨区域尺度植被模拟,而对于流域或更小面积范围的研究则相对较少。此外,受数据限制,采用大量不同环境因子进行植被空间分布模拟对于黄土高原区域往往具有一定局限性。地形作为环境因子中相对便于获得的空间变量,可以较好揭示植被生境适宜性或有效反映植被空间分布格局^[44]。国内外学者应用地形已成功模拟并预测了植被潜在分布格局^[45-46]。因此,对于数据较为缺乏的黄土高原区域,开展基于地形数据的植被潜在分布格局模拟与预测理论上应具有吸引力。

4.3 基于模型模拟的防护林建设水文影响研究

黄土高原防护林建设的直接防护功能在于有效防治土壤侵蚀。随着区域水文水资源问题的突出及全球气候变化,防护林建设应以实现生态水文功能为主导目标,即在防治侵蚀产沙的同时,有效调节流域水文循环与水量分配。尽管恢复生态学水分限制因素理论在防护林建设中已达成广泛共识,但防护林建设的生态水文学目标仍然未能有效体现,缺乏防护林体系对水文水资源的影响评价。植被覆被变化、植被组成变化,甚至植被空间分布的变化均可能引起水文水资源显著变化^[47-49],只有通过防护林体系景观优化布局与防护林林分种间优化配置才能真正实现流域水沙平衡。应用模型探讨流域生态水文过程与机制为广大学者所青睐,特别是基于物理过程分布式水文模型的发展为研究植被-水文耦合响应关系提供了强有力的工具。国内关于植被变化流域水文响应模拟研究主要侧重于植被覆被变化的流域水文模拟^[50],而对于植被组成的变化、植被空间分布格局的变化等则未予以足够重视。借助不同尺度生态水文模型以及其中的要素模型,可以探讨植被覆被变化、植被空间格局变化甚至植被组成变化引起的流域水文水资源变化。这不仅对于景观或区域尺度防护林建设植被类型选择,空间对位配置目标区域选择,以及林分尺度树种组成选择等都将具有重要的指导意义,同时对于保障区域水资源正常供给,促进区域社会的可持续发展有重要的战略意义,有必要加强基于模型模拟的防护林植被建设水文影响研究。

References:

- [1] Han E X, Han G. Effect of water and heat changes of main site types on the growth of *Robinia pseudoacacia* L. on Weiwei Loess Plateau Ravine Region. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, 19(5): 195-198.
- [2] Shan C J, Liang Z S, Han R L, Hao W F. Characteristics of *Robinia pseudoacacia* water physiological ecology under different habitats in North Shaanxi gully areas of Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7): 1205-1212.
- [3] Bao X B. Dynamic analysis of landscape pattern for eco-economic forest system of Xinsui watershed, Shanxi Province. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1997, 11(4): 22-27.
- [4] Zhi L, Li N Y, Liu J C, Xu W Q. Assessment of ecological and economical impacts of the 3-north shelterbelt forest system program in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(11): 122-131.
- [5] Zhu J Z, Wei T X, Zhang X P. Arrangement of protective forest system in gullied-hilly loess area based on water balance. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(5/6): 5-13.
- [6] Yang G, Xue Z D, Liang Y M. A discussion on spatial arrangement of vegetation of artificial construction and the main construction Techniques. *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, 7(2): 136-139.
- [7] Sun G, Zhou G Y, Zhang Z Q, Wei X H., McNulty S G, Vose J M. Potential water yield reduction due to forestation across China. *Journal of Hydrology*, 2006, 328: 548-558.

- [8] Ludeke A K, Maggio R C, Reid L M. An analysis of anthropogenic deforestation using logistic regression and GIS. *Journal of Environmental Management*, 1990, 31: 247-259.
- [9] Dorren L K A, Berger F, Imeson A C, Maier B, Rey F. Integrity, stability and management of protection forests in the European Alps. *Forest Ecology and Management*, 2004, 195: 165-176.
- [10] Van Noord H. The role of geomorphological information in ecological forest site typology in mountainous areas: a methodological study in the E-R tikon and NW-Montafon mountains (Vorarlberg, Austria). Amsterdam: University of Amsterdam, 1996.
- [11] Stoffel M, Wehrli A, Kühne R, Dorren L K A, Perret S, Kienholz H. Assessing the protective effect of mountain forests against rockfall using a 3D simulation model. *Forest Ecology and Management*, 2006, 225: 113-122.
- [12] Brang P. Resistance and elasticity: promising concepts for the management of protection forests in the European Alps. *Forest Ecology and Management*, 2001, 145: 107-119.
- [13] Nagata S. Accomplishments and challenges of reforestation in Japan: 140 years of history after the Meiji Restoration//Lee D K ed. *Keep Asia Green*. Vienna: IUFRO World Series Volume (20-II), 2007.
- [14] Teplyakov V K, Filipchuk A N, Rodin S A. Rehabilitation of Russian forests//Lee D K ed. *Keep Asia Green*. Vienna: IUFRO World Series Volume (20-II), 2007.
- [15] Calder I R. *Blue Revolution: Integrated Land and Water Resource Management*. London: Earthscan, 2005.
- [16] Guo Z S. Research on Effective Cover Rate and Its Determining Method for Soil and Water Conservation Forests. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1996, 2(3): 67-72.
- [17] Wu Q X. Vegetation resources and suitable vegetation coverage on Loess Plateau. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(6): 6-7.
- [18] Chen Y M, Liang Y M, Cheng J M. The zonal character of vegetation construction on Loess Plateau. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(3): 339-345.
- [19] Rao L Y, Zhu J Z. Advance of spatial allocation for protection forest. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(2): 102-106.
- [20] Wang S P, Zhang Z Q, Sun G, McNulty S G, Zhang H Y, Li J L, Zhang M L. Long-term streamflow response to climatic variation in a Small Watershed in Northwestern China's Loess Plateau. *Journal of American Water Resources Association*, 2008, 44(5): 1098-1107.
- [21] Zhang Z Q, Wang S P, Sun G, McNulty S G, Zhang H Y, Li J L, Zhang M L, Klaghofer E, Strauss P. Evaluation of the MIKESHE model for application in the Loess Plateau, China. *Journal of American Water Resources Association*, 2008, 44(5): 1108-1120.
- [22] Wu Q X, Yang W Z. *Vegetation Construction and its Sustainable Development in Loess Plateau*. Beijing: Science Press, 1998: 105-120.
- [23] Yang W Z. Zonal study of soil water content of Loess Plateau and plantation. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1981, (2): 13-15.
- [24] He X W, Liu G Q, Guo M H. On water resources environment for vegetation planning in the Loess Plateau. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(7): 843-847.
- [25] Yang W Z. Soil water resources and afforestation in Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 433-438.
- [26] Wang Y F. *The Vegetation Resources and their Rational Usage on the Loess Plateau, China*. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1991: 46-51.
- [27] Xu J X. Thresholds in vegetation-precipitation relationship and the implications in restoration of vegetation on the Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1234-1239.
- [28] Wang G L, Liu G B, Chang X, Xu M X. A study on the effect of soil water on vegetation rehabilitation in watershed of loess hilly area. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(3): 339-344.
- [29] Bi H X, Li X Y, Li J, Guo M X, Liu X. Study on suitable vegetation cover on Loess Area Based on soil water balance. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(4): 17-23.
- [30] Wang H S. Review on tactics of vegetation restoration in Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2(1): 42-45.
- [31] Liang Y M. Discussing issues about establishing vegetation on Loess Plateau according to the law of community. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1999, 19(5): 26-31.
- [32] Yuan J Z, Zhang H X. *Optimized Models for Estimating Forest Vegetation on the Loess Plateau*. Beijing: Science Press, 1991: 36-48.
- [33] Wen Z M, He X H, Jiao F, McVicar T R, Li L T, Van Niel T G. Mapping the vegetation suitability in the Coarse Sandy Hilly Area of the Loess Plateau, China. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(1): 19-26.
- [34] McVicar T R, Li L T, Van Niel T G, Zhang L, Li R, Yang Q K, Zhang X P, Mu X M, Wen Z M, Liu W Z, Zhao Y A, Liu Z H, Gao P. Developing a decision support tool for China's re-vegetation program: simulating regional impacts of afforestation on average annual streamflow in the

- Loess Plateau. *Forest Ecology and Management*, 2007, 251: 65-81.
- [35] Ren H, Liu Q, Li L H. *Restoration ecology*. Beijing: Science Press, 2008:15-25.
- [36] Joo H S, Pil S P, Lee D K. *Forest Restoration in Korea*//Lee D K ed. *Keep Asia Green*. Vienna: IUFRO World Series Volume (20-II), 2007.
- [37] Zebisch M, Grothmann T, Schrter D, Hasse C, Fritsch U, Cramer W. Climate change in Germany — Vulnerability and adaptation of climate sensitive sectors. [2009-4-25]. <http://www.umweltbundesamt.de>.
- [38] Bai S Y, Bao Y, Bao Y H, Zhang S W. Spatial decision analysis on the County's reducing cultivated land to plant forest and grass under the support of RS and GIS-Given the example of Wuchuang county. *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 2004, 18(1): 104-110.
- [39] Zhang J T. *Methods of vegetation quantitative ecology*. Beijing: Science Press, 2004:139-227.
- [40] Bai W J, Jiao J Y, Ma X H, Wen Z M, Jiao F. Classification and ranking of the forae naturally recuperating on the farming-withdrawn land in the hilly and gully regions of the Loess Plateau. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25 (7): 1317-1322.
- [41] Xiang H. Yue M. Quantitative classification and environmental interpretation on forest communities in Loess Plateau of the north of Shaanxi Province. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2001, 21 (4): 726-731.
- [42] Austin M P, Nicholls A O, Doherty M D, Meyers J A. Determining species response functions to an environmental gradient by means of a beta-function. *Journal of Vegetation Science*, 1994, 5: 215-228.
- [43] Lenihan J M. Ecological response surfaces for North American Boreal tree species and their use in forest classification. *Journal of Vegetation Science*, 1993, 4(5): 667-680.
- [44] Fontaine M, Aerts R, Özkan K, Mert A, Gülsoy S, Stiel H, Waelkens M, Muys B. Elevation and exposition rather than soil types determine communities and site suitability in Mediterranean mountain forests of southern Anatolia, Turkey. *Forest Ecology and Management*, 2007, 247: 18-25.
- [45] Hörsch B. Modelling the spatial distribution of montane and subalpine forests in the central Alps using digital elevation models. *Ecological Modeling*, 2003, 168: 267-282.
- [46] Hu Z W, Shen Z H, Lu N, Zhao J, Li D X, Chen H, Wang G F. Impacts of topography of the spatial pattern of the age of forest community. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31 (5): 814-824.
- [47] 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.
- [48] Fohrer N, Haverkamp S, Eckhardt K, Frede H. Hydrologic response to land use changes on the catchment scale. *Physics and Chemistry of the Earth, Part, B: Hydrology, Oceans & Atmosphere*, 2001, 26: 577-582.
- [49] Wattenbach M, Zebisch M, Hattermann F, Gottschalk P, Goemann H, Kreins P, Badeck F, Lasch P, Suckow F, Wechsung F. Hydrological impact assessment of afforestation and change in tree-species composition-A regional case study for the Federal State of Brandenburg (Germany). *Journal of Hydrology*, 2007, 346: 1-17.
- [50] Zhang X P, Zhang L, McVicar T R., Van Niel T G, Li L T, Li R, Yang Q K, Wei L. Modelling the impact of afforestation on average annual streamflow in the Loess Plateau, China. *Hydrological Process*, 2008, 22:1996-2004.

参考文献:

- [1] 韩恩贤, 韩刚. 渭北高原沟壑区主要立地类型水热变化及对刺槐生长影响研究. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(5): 195-198.
- [2] 单长卷, 梁宗锁, 韩蕊莲, 郝文芳. 黄土高原陕北丘陵沟壑区不同立地条件下刺槐水分生理生态特性研究. *应用生态学报*, 2005, 16(7): 1205-1212.
- [3] 包晓斌. 晋西昕水河流域生态经济型防护林体系景观格局动态分析. *干旱区资源与环境*, 1997, 11(4): 22-27.
- [4] 支玲, 李怒云, 刘俊昌, 许文强. 三北防护林体系建设工程的生态经济评价——以固原市原州区和辽宁省朝阳县为例. *林业科学*, 2007, 43(11): 122-131.
- [5] 朱金兆, 魏天兴, 张学培. 基于水分平衡的黄土区小流域防护林体系高效空间配置. *北京林业大学学报*, 2002, 24(5/6): 5-13.
- [6] 杨光, 薛智德, 梁一民. 陕北黄土丘陵区植被建设中的空间配置及其主要建造技术. *水土保持研究*, 2000, 7(2): 136-139.
- [16] 郭忠升. 水土保持林有效覆盖率及其确定方法的研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 2(3): 67-72.
- [17] 吴钦孝. 黄土高原的林草资源和适宜覆盖率. *林业科学*, 2000, 36(6): 6-7.
- [18] 陈云明, 梁一民, 程积民. 黄土高原林草植被建设的地带性特征. *植物生态学报*, 2002, 26 (3): 339-345.
- [19] 饶良懿, 朱金兆. 防护林空间配置研究进展. *中国水土保持科学*, 2005, 3(2): 102-106.

- [22] 吴钦孝, 杨文治. 黄土高原植被建设与持续发展. 北京: 科学出版社, 1998:105-120.
- [23] 杨文治. 黄土高原土壤水分分区(试拟)与造林问题. 水土保持通报, 1981, (2):13-15.
- [24] 何小武, 刘广全, 郭孟华. 黄土高原植被建设的水资源环境及对策. 水利学报, 2008, 39(7): 843-847.
- [25] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林. 自然资源学报, 2001, 16(5): 433-438.
- [26] 王义凤. 黄土高原地区植被资源及其合理利用. 北京: 中国科学技术出版社, 1991:46-51.
- [27] 许炯心. 黄土高原植被-降水关系的临界现象及其在植被建设中的意义. 生态学报, 2005, 25(6):1234-1239.
- [28] 王国梁, 刘国彬, 常欣, 许明祥. 黄土丘陵区小流域植被建设的土壤水文效应. 自然资源学报, 2002, 17(3):339-344.
- [29] 毕华兴, 李笑吟, 李俊, 郭孟霞, 刘鑫. 黄土区基于土壤水平衡的林草覆被率研究. 林业科学, 2007, 43(4):17-23.
- [30] 王晗生. 黄土高原植被恢复策略回顾. 中国水土保持科学, 2004, 2(1):42-45.
- [31] 梁一民. 从植物群落学原理谈黄土高原植被建设的几个问题. 西北植物学报, 1999, 19(5):26-31.
- [32] 袁嘉祖, 张汉雄. 黄土高原地区森林植被建设的优化模型. 北京: 科学出版社, 1991:36-48.
- [33] 温仲明, 赫晓慧, 焦峰, McVicar T R, Li L T, Van Niel T G. 黄土高原多沙粗沙区植被适宜性空间分析与制图. 中国水土保持科学, 2007, 5(1):19-26.
- [35] 任海, 刘庆, 李凌浩. 恢复生态学导论. 北京: 科学出版社, 2008:15-25.
- [38] 白淑英, 宝音, 包玉海, 张树文. 遥感和 GIS 支持下县域退耕还林还草空间决策分析. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1):104-110.
- [39] 张金屯. 植被数量生态学方法. 北京: 科学出版社, 2004:139-227.
- [40] 白文娟, 焦菊英, 马祥华, 温仲明, 焦峰. 黄土丘陵沟壑区退耕地自然恢复植物群落的分类与排序. 西北植物学报, 2005, 25(7): 1317-1322.
- [41] 相辉, 岳明. 陕北黄土高原森林植被数量分类及环境解释. 西北植物学报, 2001, 21(4): 726-731.
- [46] 胡志伟, 沈泽昊, 吕楠, 赵俊, 李道兴, 陈华, 王功芳. 地形对森林群落年龄及其空间格局的影响. 植物生态学报, 2007, 31(5): 814-824.