

森林植被对农业生态环境的调控机理评述

石 辉^{1,2}, 刘世荣¹, 孙鹏森¹

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境保护研究所, 北京 100091;

2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院教育部西北水资源与环境生态重点实验室, 西安 710055)

摘 要: 森林植被的不断减少使区域农业生态环境出现了持续恶化的趋势。森林植被通过对生态水文过程的调控, 防止土壤侵蚀的发生及养分的流失来影响区域农业生态环境, 并且在不同的农林景观格局的配置表现出不同的环境效应和尺度效应。我国在森林植被与生态环境研究方面取得了一些重要进展, 但还存在着研究尺度偏小、综合研究较少及缺少结合林业工程技术要求的应用理论研究等不足。针对研究中存在的问题, 提出了森林植被调控农业生态环境研究应解决的四个关键性科学问题及研究技术途径。

关键词: 森林植被; 农业生态环境; 调控机理

中图分类号: S181; S718 553

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2004)03-0031-06

The Mechanism of Forestry Adjusting and Controlling Agricultural Eco-environment: A Review

SHIHui^{1,2}, LIU Shirong¹, SUN Peng-sen¹

(1. Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forest Science, Beijing 100091, China;

2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The trend of agricultural eco-environment sustainable worsening occurred because of the forest's unceasing decrease. The forest affected regional agricultural eco-environment through adjusting and controlling eco-hydraulic processes, preventing soil erosion and nutrient loss. But there were different environment and scale effects for various landscape patterns of agriculture and forestry. Some key progresses were acquired about the research between forest and eco-environment, but some problems still exist such as the research scale on the low side, less comprehensive research and the lack of applied theory combining with forest engineering technology. The 4 key science problems and research route among the forest adjusting and controlling agricultural eco-environment were presented aiming at research lackages.

Key words: forest; agricultural eco-environment; adjusting and controlling

农业生态环境是人类赖以生存和发展的基础, 是实现农业可持续发展和社会经济稳定的基础。我国山地面积比例大, 农业多集中于山间盆地和山前平原。在上游林区, 不断增长的人口和农牧业的快速发展, 对森林植被构成了巨大的威胁, 面积剧减, 功能降低。这样, 许多农业生态环境问题在很大程度上都与上游森林植被破坏和减少密切相关。在人口—资源—环境矛盾突出和社会经济飞速发展的自然和社会背景条件下, 建设、保护山地森林植被, 对减免各种自然灾害、保护下游农业安全有着重要的作用。

1 森林植被影响区域农业生态环境的研究进展

1.1 森林植被结构对水文过程的影响

森林植被对水文过程的影响是森林植被的重要生态功能, 是学术界广为关注的问题之一。但由于植被条件、气候条件和地形地貌条件的不一致, 在森林植被影响产水量方面存在着广

泛争论^[1,2]。为了解决这一问题, 森林植被特征与水文过程的耦合关系及作用机制和尺度已成为现阶段研究的重点^[3]。

森林植被对水文过程的影响可分为冠层、地被物层和根土作用层三个层次。冠层主要通过降水对降水的截留和蒸腾耗水影响水文过程。林冠对降水的截留量一般可占到年降雨量的 15% ~ 30%, 并随降水的性质、林分及林冠湿润程度以及风向、风速、地形、坡向、坡度等因素而变化^[4]。在我国, 各类森林生态系统冠层截留率的大小表现为: 亚热带西部高山常绿针叶林 > 热带半落叶季雨林 > 温带山地落叶与常绿针叶林 > 热带山地雨林 > 寒温带、温带山地常绿针叶林 > 亚热带竹林 > 亚热带、热带东部山地常绿针叶林 > 南亚热带山地季风常绿阔叶林 > 寒温带、温带山地落叶针叶林 > 温带、亚热带山地落叶阔叶林 > 亚热带山地常绿阔叶林 > 亚热带、热带西南部山地常绿针叶林 > 亚热带山地常绿阔叶阔叶混交林。由于降水与截留关系的复杂性, 截流量大, 并不一定截流率高。^[2]为了模

收稿日期: 2004-02-25

基金项目: 国家重点基础研究规划项目“西部典型地区森林植被对农业生态环境的调控机理”(2002CB111502); 国家杰出青年基金项目(30125036); 国家自然科学基金重点项目(30230290)资助

作者简介: 石辉(1968-), 男, 陕西眉县人, 教授, 从事水土保持与环境生态研究。

拟林冠截留和降水的关系,一系列经验或理论模型被提出^[5,6]。蒸散作为植物生命活动必须的耗水过程,且是水文损失的主要途径,它与森林植被结构有着密切的关系^[7]。对蒸散耗水,从枝叶、单木、林分和区域等不同尺度水平进行了研究,但目前的研究主要局限在单木以下的微观水平,不能说明森林蒸腾耗水对水文过程的影响。林分尺度的研究主要利用水文学和微气象学方法进行,其中的一个难点问题就是如何确定冠层气孔阻力的大小^[8];区域尺度的研究则是利用遥感技术获取植被生态信息,进行区域性的计算模拟。在半湿润半干旱地区,水分不足直接影响着森林植被建设,森林耗水、土壤水分环境变化和森林植被的水分稳定性,是进行生态用水区划和缺水地区优化调控森林植被结构的基础,也是生产中急需解决的问题^[9]。如何将微观尺度研究的结果转化为较大尺度林分和区域等^[10],对于认识森林的生态水文功能、森林保护水源的机理,以及生态环境建设有着重要的意义。

地被物层包括森林生态系统下部的一些植被和枯枝落叶层,其水文作用主要表现在枯枝落叶层上。对降水的吸持和提高地表糙率,减小径流速率成为其水文行为的主要特点。枯枝落叶层具有很强的持水能力,一般吸持的水量可达自身干重的 2~4 倍。由于我国森林枯落物现存量的地理分布呈由高纬度、高海拔森林向低纬度、低海拔森林递减的规律,因此森林枯落物的持水功能也就呈现出随纬度和海拔高度的增大而增强的格局^[2]。地被物层的存在,可提高地表的糙率^[11],即使黄土区稀疏植被所形成的地被物层也对地表糙率有重要的影响^[12]。由于糙率的提高,减缓了坡面径流流速,仅 0.5 cm 厚的油松、山杨可削减径流流速 80%~90%^[13]。

在冠层、地被物层和根土作用层三个层次中,根系层土壤是形成森林植被水文功能的核心地带,是森林植被水文功能形成的关键^[14]。根土作用层作为土壤水库,一方面满足植被蒸腾耗水的需求,另一方面通过降水入渗,涵养水源。在干旱半干旱地区,由于部分造林树种的强烈蒸腾作用,使根土作用层土壤水库的贮水量减少,形成了生物成因的土壤干层^[15]。根据土壤水分运动的基本理论,一次降水的入渗深度一般小于 100 cm,这样,深层土壤水分的补给并不是一般土壤入渗的结果,而是土壤优势流的结果。大孔隙流是优势流的一种主要表现形式,指水分在运动过程中不能与土体发生充分的相互作用,而是直接快速地进入土壤深层,从而对森林土壤入渗、坡面产流和深层蓄水产生重要的影响,部分研究认为大孔隙流是土壤水分可能来源的惟一通道^[16]。Beasley^[17]曾发现在森林坡地上,降水 20 min 后出现了壤中流,而此时土壤上层剖面并没有达到饱和;Mosley^[18]计算之后,发现 40% 的降水沿着大孔隙迅速入渗;Harr^[19]发现在一些陡坡流域上,壤中流提供了暴雨径流的 97%。传统的土壤物理理论认为,非饱和流的运动特别慢,除非下部土壤达到饱和,否则壤中流不可能成为当次降水的主要径流来源^[20]。De Vries 等 Chow^[21]研究后认为,在相同水力导度下,大孔隙产生的优势流可比基质势引起的水分运动更快,入渗深度更深,大孔隙是壤中流的快速出现主要因素。Wilson 等^[22]在森林坡地上研究表明,坡地大孔隙是壤中流的主要机制,特别那些直径大于 1 mm 的孔隙,虽然数量很少,但对传导水流有着重要的因素,大中孔隙的不同组合有着不同的导水速率^[23]。因此,研究森林土壤的大孔隙结构特征及时空变异规律,模拟存在大孔隙流的水分运动过程,了解存在大孔隙流

时的坡面产流过程,对于进一步认识森林植被与水关系的问题有重要的意义。同时,由于土壤和植被在较大区域空间存在异质性,导致了根土作用层水分运动参数也存在空间变异,研究了解这些变异,可深化植被吸水过程和区域水文循环的认识,建立起综合考虑冠层截持、蒸发、入渗、土壤水分运动、径流组成及各过程间的相互关系的复合产流理论^[24],这些模型的一个重要特点是考虑了暴雨径流中土壤大孔隙的快速入渗、壤中流和回归流过程^[25]。

各种新技术的广泛应用促进了森林植被生态水文过程研究的深入。稳定性氢氧同位素的应用,在认识植物吸收利用水分来源方面有着重要的作用,为深化植被的生态水文功能研究提供了有利的工具^[26]。信息技术和景观生态学理论的结合所形成的模型可预测森林植被变化对农业生态环境的影响^[27]。模型一般分为集总式模型和分布式模型。由于集总式模型不考虑流域内的空间异质性,因而不能反映和预测流域内的自然、人为因素对水文过程的影响^[28]。分布式模型考虑了流域内的时空变异规律,和集总式模型相比,能更有效地预测和评价流域管理行为的影响,从而指导林业生产^[29,30]。异质性以及由此产生的尺度问题的研究是认识森林植被生态环境影响机理的制约性因素之一。现在有关生态水文和土壤侵蚀的研究,观测主要在一些小尺度上进行,其模型的结构和参数有别于大尺度,如何将小尺度的研究成果应用于异质性高的较大尺度,则是一个亟待解决的问题。

1.2 森林植被防止土壤侵蚀、减少养分流失以及进河泥沙

水土流失是导致土地生产力下降和各种水体富营养化的核心问题,森林植被减少水土流失主要通过削减降水动能、增强入渗和提高土壤抗侵蚀能力来实现的。同样,植被防止土壤侵蚀由冠层、地被物层和根土作用层三个部分组成。

冠层防止土壤侵蚀的作用主要表现在截持降水和对雨滴动能的影响。冠层对降水的再分配,使得植被群落内的降水低于空旷地带,并且对于草本植被和数目的冠丛而言,雨滴的打击能力也有所下降,这样减轻了雨滴对土粒的剥离和溅击作用。但在乔木林内,由于雨滴在冠层的重组,使得雨滴的直径增大,而冠层距地面的距离又使雨滴能够达到终点速率,这样林内的降雨动能反而高于林外^[31,32]。如果没有林下地被物的话,大的降雨动能可导致比林外更强的水土流失。黄土高原的强烈土壤侵蚀主要由少数几场大暴雨所产生,往往一次大暴雨的侵蚀量占到年侵蚀总量的 60% 以上^[33]。在这种情况下,林冠对防止土壤侵蚀的作用较小。

地被物层的主要作用表现在对降水的吸收、截留,防止溅蚀、促进入渗,延缓地表径流产生,抵抗地表径流冲刷等方面。一些研究表明,植被的防蚀作用与地面的枯枝落叶层有密切的关系,在黄土高原常见的坡度(25°),如果有 1 cm 厚的枯枝落叶层,即可降低径流速率 80%~90%,基本防止溅蚀的发生,减少土壤侵蚀量 50% 以上;有 5 cm 厚的枯枝落叶层可减少土壤侵蚀量 80% 以上^[13]。即使林木砍伐后,如果能保持地表的枯枝落叶层和近地表植被,也具有相当的防止土壤侵蚀效果^[34],这种水土保持功能随时间的延长而减弱^[35]。因此,人们认为植被防止土壤侵蚀效果的好坏关键取决于地表植被覆盖和地表枯枝落叶层的质量和数量^[36]。

根土作用层一方面体现在其透水性及贮水性以及根系与枯枝落叶层共同作用对土壤物理性状和结构的改善,另一方面表现为根系对土壤的固持。鉴于黄土高原的侵蚀以各种线

状的沟蚀为主^[37], 径流冲刷是主要的侵蚀方式, 朱显谟院士将土壤抗侵蚀能力划分为土壤抗蚀性和抗冲性, 抗冲性主要指土壤抵抗径流冲刷的能力^[38]。根系对土壤的固持提高了土壤的抗冲性, 随着土壤抗冲性的提高土壤侵蚀减弱^[39, 40]; 一些学者采用不同的方法研究了一些植被根系的抗冲性^[41-43], 同时对植被恢复和土壤抗冲性形成过程进行了研究^[44]。

现阶段关于植被防止土壤侵蚀的研究主要集中于产生水土保持效益的有效植被盖度^[45, 46]以及冠层、地被物层和根土固结层单独防止土壤侵蚀的效果, 对三个层次综合作用的效果研究很少。现有的在土壤侵蚀预报模型中, 将森林生态系统动态过程与土壤侵蚀物理过程进行耦合模拟来揭示森林生态系统防止土壤侵蚀的动态变化是目前研究的空白点。

1.3 农林景观格局和区域农业生态环境之间的关系

景观是指不同大小、形状和面积的景观组分镶嵌体, 景观格局的保持和变化受自然和人为干扰的影响。农林景观格局是农林牧在一定区域空间上的配置, 在不同的区域有不同的表现形式, 即受自然环境条件的制约, 又受人类经营活动的影响, 分别表现出纯的农、林、牧景观和农林牧组合型的复合景观。在自然条件愈复杂的地区, 愈表现出景观的多样性。水土环境是农业生态环境的最重要组成部分, 由于不同的农林景观格局有不同的物质流过程, 因而可利用景观格局控制水分、养分的流动过程, 防止农业生态环境的恶化。

不同的景观空间格局(林地、草地、农田、裸露地等的不同配置)通过对径流、土壤侵蚀和元素迁移的影响而改变农业生态环境。在黄土坡面上的研究表明, 不同的土地利用方式在空间上的组合, 可以显著地影响土壤中的水分、养分和水土流失程度; 在黄土坡地上, 从上到下以林地—耕地—草地组合为一种较好的景观格局^[47, 48]。景观单元的镶嵌和交错格局将影响景观及其单元的相互作用^[49], 通过利用不同净化能力的植物在空间上的镶嵌组合形成的人工生态系统处理污水, 可使水体中藻类的生物量下降 58%, 总氮下降 60%, 总磷下降 72%^[50]。Peterjohn 和 Correll^[51]的研究表明, 不同的景观单元对营养元素的转化和滞留有不同的作用, 景观单元内部营养元素流决定于单元的个体行为, 而景观单元的空间组合(格局)则影响着整个景观的物质流规律。一旦景观格局发生变化, 则景观单元之间的水分、养分流的数量和强度则发生变化, 从而导致土地利用方式的变化, 反之又导致了景观格局的变化^[52]。因此一个理想的景观格局管理和设计, 首先是保证尽可能多地使物质在景观内部流动, 控制物质流失。

景观单元界面之间的物质流动, 是景观格局的一个最主要特征, 也是景观格局调节农业生态环境的基础。研究农林复合景观的界面过程与耦合机理, 分析关键耦合过程的时空尺度分异规律, 对于区域农林复合景观的生态服务功能的形成、农林复合景观的区域生态环境效应、农业资源可持续利用有重要的意义。

1.4 森林植被影响农业生态环境的尺度范围

格局—尺度—过程是景观生态学研究的核心问题, 森林植被的格局以及景观单元内部的物质、能量研究是森林植被影响农业生态环境的基础, 但这种调控的范围尺度以及强度则存在广泛的争论。基于森林对林外广大地区的气候有很大影响的事实, 形成了一种森林影响农业生态环境的范围和强度是巨大的观点, 从而导致了—一个国家的森林面积达到国土面积的 30% 以上, 农业才能高产稳产; 植树造林, 不仅南方

有水, 北方也会风调雨顺的认识。针对这种无限地夸大森林作用的现象, 黄秉维先生依据大量的研究, 说明了森林对农业生态环境的影响是有限的。上世纪 80 年代初在我国引起了的关于森林作用的大讨论, 使得一些认识得到进一步澄清^[53, 54]。小尺度的研究表明森林植被对农业生态环境有一定的调节作用, 但在大的尺度上这种作用表现不明显, 因此森林植被影响农业生态环境的范围尺度以及强度研究是正确认识和利用森林植被的基础。

2 我国在森林植被和生态环境建设中所存在的问题

我国已在森林植被影响生态环境方面取得了不少的研究成果, 但仍有很多基础理论和技术问题亟待解决, 这些问题在一定程度上已影响了国家宏观决策和一些重大工程的科技水平。以往研究的不足突出表现为:

(1) 小尺度研究偏多, 中大尺度研究偏少。

(2) 证明森林植被生态效益存在的简单对比较多, 揭示效益形成机制的基础性研究偏少。

(3) 静态研究偏多, 动态研究偏少。

(4) 单项和分散研究偏多, 多学科、多尺度、多过程的综合研究较少。

(5) 森林植被生态功能的正面研究较多, 环境胁迫特别是水分胁迫对森林植被稳定性影响的研究偏少。

(6) 揭示和解释自然现象的研究偏多, 结合林业生态工程技术需求的应用理论研究较少。

由于这些问题尚未解决, 在生态环境建设林木种类的选择和布局方面出现偏重短期造林成就而轻视森林植被的长期稳定性, 致使森林植被的生态效益不能充分发挥或有时产生负面影响, 不能满足大规模生态环境建设中的多目标和多尺度的要求。

3 森林植被调控农业生态环境应解决的关键性科学问题

在我国, 区域农业生态环境的主要问题是水土资源与环境安全问题, 黄土高原的水资源短缺、水土流失, 西北华北地区的连年干旱, 长江流域的洪涝灾害, 均是区域水文循环和生态过程的极端表现。因此, 我国农业生态环境问题的实质是水, 它在不同典型区域的表现不同的生态环境问题, 对水的有效调控和利用将成为解决区域农业生态环境问题的根本出路。森林植被通过对景观单元和景观界面之间, 以水为主要物质和载体的调控, 可完成对水土资源的调控作用和对生态环境的不可替代的调节功能。因此, 区域农业生态环境问题的解决必须以森林植被与水的相互关系为突破口, 针对不同典型区域农林复合景观开展研究。

针对森林植被结构特征的异质性、生态过程与水文过程的关联性以及尺度问题的广泛性, 在格局—过程—尺度的理论模式下, 采用多尺度实测分析和分布式数值模拟技术实现生态过程与水文过程耦合, 则是森林植被调控农业生态环境应解决的关键性科学问题。具体可以归结为以下几点:

3.1 森林植被生态水文过程的耦合与尺度转换

陆地生态水文过程中存在着高度的非线性和时空变异性, 森林植被由于直接参与陆地水文过程, 其结构和演变是动态过程, 不能被看作是水文景观的静态要素, 其对区域农业生

态环境的影响主要体现在不同尺度森林植被的水文过程与生态过程的耦合效应上;同时,由于自然界“过程尺度”的多变性和人类“观测尺度”的相对局限性,尺度间的匹配与转换问题显得尤为突出。因此,森林植被生态水文过程的耦合与尺度转换是说明森林植被调控农业生态环境范围大小的基础。

3.2 森林植被根土作用层的水文功能

根土作用层是森林植被水文功能的最重要组成部分,是森林生态效应的基础。根土作用层根系的特征、固土作用方式、强度是森林植被防止侵蚀产沙、搬运、沉积过程的基础;根土作用层对水分的入渗、贮存、根系吸水和蒸腾蒸发是森林植被涵养水源的基础。这对于进一步认识森林植被环境效应及建立具有良好水土保持调控功能森林植被体系有重要的意义。

3.3 森林植被定向恢复重建的功能群界定与生态演替的催化效应

由于人类生产活动的影响,一些森林植被出现了严重的破坏和退化,对退化的森林生态系统进行恢复,使其恢复原有的生态功能,是生态环境建设的首要课题。对这种生态系统的恢复是以生态系统功能的恢复为主要目标,因而生态系统功能群的界定就成为一个重要的科学问题,为了尽快建立功能群,恢复生态系统的功能,还需选择合适的催化种,利用催化种的催化效应,快速恢复不同功能群达到近自然植被的多态结构和景观优化模式。

3.4 区域农林复合景观格局的生态耦合关系

农业景观在一个区域内是以农林牧复合景观为主要表现形式。区域内农林复合景观格局特征、水分、养分循环与价值流的基本规律,是揭示区域农林间的生态过程耦合、转化关系及其空间分异特征的基础。在上述研究的基础上,建立区域水土资源优化利用与合理配置的农林(牧)协调发展的互补模式,是森林植被对区域农业生态环境调控机理的核心问题。

这些关键科学问题的解决,可回答森林植被调控区域农业水土资源与环境的尺度效应和作用强度问题,为森林植被的恢复重建、农林景观优化配置模式提供科学依据。

4 研究森林植被调控农业生态环境的技术途径

森林植被调控农业生态环境是一个复杂多变的非线性系统,涉及多界面、多尺度的过程与机制研究,同时涉及到林学、生态学、水文学、农学、大气科学、环境科学、社会经济学、数学、信息科学等多学科交叉问题。图 1 是森林植被调控区域农业生态环境研究的技术途径。从时间尺度上从定位观测的 s、m、in、h,直到植被演替的几百上千年尺度;在空间尺度上从一个坡面景观缀块的生态系统,几个平方公里的小流域,到几千平方公里的区域,甚至达上万平方公里的流域;从过程来看,既包括纯的水文过程,又包括生态过程,形成一种耦合的过程关系;从应用目标 and 需求来看,既覆盖了小的生态系统的恢复重建,又包括了区域农林景观格局的配置,从

而对区域农业生态安全格局进行评价和设计。因此在技术途径上必须采取多学科交叉联合方式和系统集成,才能完成森林植被调控农业生态环境的研究。

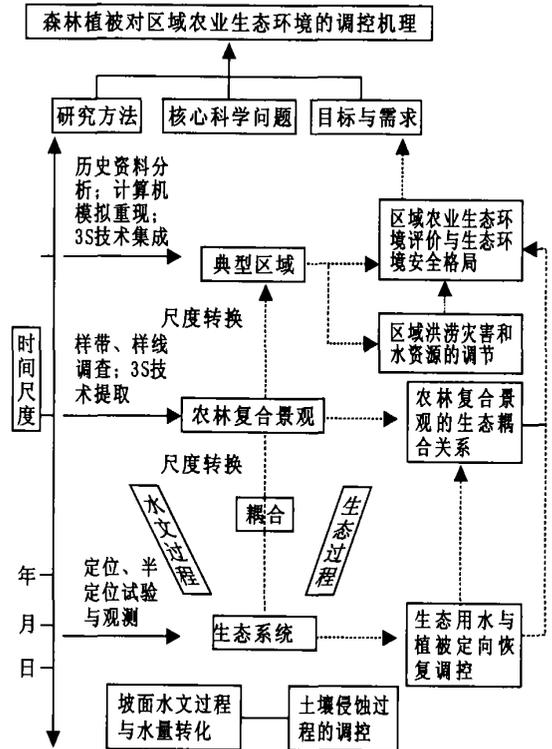


图 1 森林植被调控区域农业生态环境研究技术途径框图

生态环境建设是我国可持续发展的基础,而林业生态环境建设则在《全国生态环境建设规划》中处于核心地位。天然林保护工程、长江上游和黄河中上游为重点的退耕还林(草)试点等重要生态工程的实施,为森林植被调控农业生态环境机理研究提出了新的目标和要求。在目前森林植被建设的国家目标形势下,加深对有关基础规律的科学认识,发展在最新科技成果支持下的大区域尺度的林业生态环境建设的科学合理规划关键技术,指导恢复和构建稳定高效的森林植被,促进区域农业生态环境的根本改善,这对于实现国家可持续发展战略、实施西部大开发战略、提高生态环境建设的质量和速度都有巨大的意义,是国家的重大和基础性科技需求。

致谢:

本文是国家“973”项目“西部典型区域森林植被对农业生态环境的调控机理”的基本思路。向在讨论过程中提出了宝贵意见的兰州大学的王刚教授,中国科学院沈阳应用生态研究所的裴铁藩研究员、何兴元研究员、金昌杰研究员、曾德慧研究员,中国科学院水土保持研究所的上官周平研究员,北京师范大学的葛建平教授,北京林业大学的余新晓教授、朱清科教授、张志强博士,中国林业科学研究院的王彦辉研究员表示感谢。

参考文献:

[1] Bosch J M, J D Hewlett A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration[J]. J. Hydrol., 1982, 55: 3- 23

[2] Liu Shirong (刘世荣), Wen Yuanguang (温远光), Wang Bing (王兵), et al Ecohydrological Functions of Forest Ecosystems in China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996 (in Chinese).

[3] Robert A Vertessy, et al Factors determining relations between stand age and catchment water balance in mountain ash

- forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 143: 13- 26
- [4] Kong Fanzhi (孔繁智). The model between crown canopy interception and rainfall[J]. *Chinese Journal Applied Ecology (应用生态学报)*, 1990, (3): 201- 208 (in Chinese).
- [5] Wang Youmin (王佑民). A review of rainfall redistribution by crown canopy in China[J]. *Journal of Northwest Forest University (西北林学院学报)*, 2000, 15(3): 1- 7 (in Chinese).
- [6] Liu Jiagang (刘家刚), Wan Guoliang (万国良), Zhang Xuepei (张学培), et al. Semi-theory for crown canopy intercepting rainfall[J]. *Scientia Silvae Sinicae (林业科学)*, 2000, 36(2): 1- 4 (in Chinese).
- [7] Vertessy R A, et al. Factors determining relations between stand age and catchment water balance in mountain ash forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 143: 13- 26
- [8] Lhomme J P. Stomatal control of transpiration: Examination of the Jarvis-type representation of canopy resistance in relation to humidity[J]. *Water Resour. Res.*, 2001, 37(3): 689- 699
- [9] Wu Qinxiao (吴钦孝), Yang Wenzhi (杨文治). The vegetation construction and sustainable development in the Loess Plateau[M]. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese).
- [10] Sun Pengsen (孙朋森), Ma Lvyi (马履一). Research on water consumption characteristics of the water-source containing forest and its application[M]. Beijing: China Environmental Sci Press, 2002 (in Chinese).
- [11] Zhang Hongjiang (张洪江). Research on the coefficient of roughness n under different forestland in Shanxi Province in China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation (水土保持通报)*, 1995, 15(2): 10- 21 (in Chinese).
- [12] Shen Bin (沈冰), Wang Wenyan (王文焰). Effect of sparse vegetation on runoff formation processes on the Loess Plateau[J]. *J. Soil and Water Con. (水土保持学报)*, 1993, 7(1): 23- 28 (in Chinese).
- [13] Wang Youke (汪有科), Wu Qinxiao (吴钦孝), Zhao Hongyan (赵鸿雁), et al. The approach on anti-scourability mechanism of litter in forest land[J]. *J. Soil and Water Conservation (水土保持学报)*. 1993, 7(1): 75- 80 (in Chinese).
- [14] Bonell M. Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests[J]. *J. Hydrol.*, 1993: 150: 217- 275
- [15] Li Yushan (李玉山). Effect of forest on water circle on the Loess Plateau[J]. *J. Natural Resources (自然资源学报)*, 2001, 16(5): 427- 432 (in Chinese).
- [16] Gemann P, W M Edwards, L M Owens. Profiles of bromide and increased soil moisture after infiltration into soils with macropore[J]. *Soil Sci Soc Am. J.*, 1984, 48: 237- 244
- [17] Beasley R S. Contribution of subsurface flow from the upper slopes of forested watershed to channel flow[J]. *Soil Sci Soc Am. J.*, 1976, 40: 955- 957.
- [18] Mosley M P. Subsurface flow velocities through selected forested soils, South Island, New Zealand[J]. *J. Hydrol.*, 1982, 55: 65- 92
- [19] Harr R D. Water flux in soil and subsoil on a steep forested slope[J]. *J. Hydrol.*, 1977, 33: 37- 58
- [20] Weyman D. R. Measurements of the downslope flow of water in a soil[J]. *J. Hydrol.*, 1973, 20: 267- 288
- [21] De Vries J, T L Chow. Hydrologic behavior of a forested mountain soil in Coastal British Columbia[J]. *Water Resour. Res.*, 1978, 5: 935- 942
- [22] Wilson G V, P M Jardine, R J Luxmoore, et al. Hydrology of a forested hillslope during storm events[J]. *Geodema*, 1990, 46: 119- 138
- [23] Luxmoore R J, P M Jardine, G V Wilson et al. Physical and chemical controls of preferred path flow through a forested hillslope[J]. *Geodema*, 1990, 46: 138- 154
- [24] Jones J A A. Pipeflow contributing areas and runoff response[J]. *Hydrol Processes*, 1997, (11): 35- 41.
- [25] Bronsterta A, E J P. Modelling of runoff generation and soil moisture dynamics for hillslopes and micro-catchments[J]. *J Hydrol*, 1997, 198: 177- 195
- [26] Shi Hui (石辉), Liu Shirong (刘世荣). Application of stable hydrogen and oxygen isotope in the water circulation[J]. *J. Soil and Water Conservation (水土保持学报)*, 2003, 17(2): 163- 166 (in Chinese).
- [27] Rasamee S. GIS and hydrologic modeling for the management of small watersheds[J]. *ITC Journal*, 1994, 4: 343- 348
- [28] Kwan T L. Generating design hydrography by DEM assisted geomorphic runoff simulation: a case study[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(2): 375- 384
- [29] Swanson R H. Forest hydrology issues for the 21st century: A consultant's viewpoint[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(4): 755- 763
- [30] Dunn S M, McAlistler E, Ferrier R C. Development and application of a distributed catchment-scale hydrological model for the River Ythan, NE Scotland[J]. *Hydrol Processes*, 1998, 12: 401- 416
- [31] Zhao Hongyan (赵鸿雁), Liu Xiangdong (刘向东), Wu Qinxiao (吴钦孝), et al. A preliminary study on kinetic energy of raindrop in stands of Chinese Pine and Mountain Poplar[J]. *Memoir of N ISWC, Academia Sinica & Ministry of Water*

- Conservancy (中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊), 1991, 14: 44- 50 (in Chinese).
- [32] Lei Ruide (雷瑞德). Influences of *Pinus A m andii* crown on kinetic energy of rainfall[A]. In: Department of Science and Technology, Ministry of Forstry (林业部科技司) edited Long-term research on China's forest ecosystems [M]. Harbin: North Forestry University Press, 1994 245- 251 (in Chinese).
- [33] Zhou Peihua (周佩华), Zheng Shiqing (郑世清), Wu Pute (吴普特) et al Experimental research on soil scourability in the Loess Plateau [J]. Research of Soil Water Conservation (水土保持研究), 1997, 4(5): 45- 58 (in Chinese).
- [34] Tang Keli (唐克丽). Variation of Erosion, Runoff and Sediment in the Yellow River [M]. Beijing: China Sci & Tech Press, 1993 (in Chinese).
- [35] Yang Weixi (杨维西), Zhao Tingning (赵廷宁), Li Shengzhi (李生智), et al Study on the decrease of roots reinforcement of *Robinia Pseudoacacia* L. artificial forest after felling [J]. J. Soil and Water Conservation (水土保持学报), 1990, 4(1): 6- 10 (in Chinese).
- [36] Wang Hansheng (王晗生), Liu Guobin (刘国彬). Analyses on vegetation structure and their controlling soil erosion [J]. J. Arid Land Resour. and Environment (干旱区资源与环境), 1999, 13(2): 62- 68 (in Chinese).
- [37] Zhou Peihua (周佩华). On the erosion mechanism of Loess Soil [J]. Research of Soil Water Conservation (水土保持研究), 1997, 4(5): 40- 46 (in Chinese).
- [38] Jiang Dingsheng (蒋定生). Soil and Water Loss and Controlling Model in the Loess Plateau [J]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 1997 (in Chinese).
- [39] Li Yong (李勇), Zhu Xianmo (朱显谟), Tian Jiyong (田积莹). The validity of plant roots improving soil anti-scourability in the Loess Plateau [J]. Chinese Science Bulletin (科学通报), 1991, (12): 935- 938
- [40] Li Yong (李勇), Xu Xiaoqin (徐晓琴), Zhu Xianmo (朱显谟). The pilot study on mechanism of plant roots improving soil anti-scourability in the Loess Plateau [J]. Sciences in China (B Series) (中国科学, B 辑), 1992, (3) 254- 259 (in Chinese).
- [41] Li Yong (李勇), Wu Qinxiao (吴钦孝), Zhu Xianmo (朱显谟). Studies on the intensification of soil anti-scourability by plant roots in the Loess Plateau [J]. J. Soil and Water Conservation (水土保持学报), 1990, 4(1): 1- 5 (in Chinese)
- [42] Zhou Peihua (周佩华), Wu Chunlong (武春龙). On experimental method of soil anti-scourability by plant roots in the Loess Plateau [J]. J. Soil and Water Conservation (水土保持学报). 1993, 7(1): 29- 34 (in Chinese).
- [43] Jiang Dingsheng (蒋定生), Li Xinhua (李新华), Fan Xingke (范兴科). Study on horizontal and vertical regulation of soil anti-scourability in area with serious soil erosion on the Loess Plateau [J]. J. Soil and Water Conservation (水土保持学报), 1995, 9(2): 1- 7 (in Chinese).
- [44] Liu Guobin (刘国彬). Vegetation restoration and improvement process of soil anti-scourability in Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation (水土保持研究), 1997, 4(5): 102- 128 (in Chinese).
- [45] Jiao Juying (焦菊英), Wang Wanzhong (王万中), Li Jing (李靖). Effective cover rate of woodland and grassland for soil and water conservation [J]. Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报), 2000, 24(5): 608- 612 (in Chinese).
- [46] Wu Qinxiao (吴钦孝). The resources of woodland and grassland and suitable cover rate [J]. Scientia Silvae Sinicae (林业科学), 2000, 36(6): 6- 7 (in Chinese).
- [47] Fu Bojie (傅伯杰), Chen Dingli (陈利顶), Ma Keming (马克明). The effect of land use change on the regional environment in Yuanguangou catchment in the Loess Plateau [J]. Acta Geographica Sinica (地理学报), 1999, 54(3): 421- 246 (in Chinese).
- [48] Fu Bojie (傅伯杰), Ma Keming (马克明), Zhou Huafeng (周华峰). The effects of land use structure to distribution of soil nutrients in the Loess Hilly and Gully Region [J]. Chinese Science Bulletin (科学通报), 1998, 43(22): 2444- 2447 (in Chinese).
- [49] Wang Yanglin (王仰麟). Advance of agricultural landscape and process [J]. Advance of Environment Science (环境科学进展), 1998, 6(2): 29- 34 (in Chinese).
- [50] Wang Guoxiang (王国祥). The purification of artificial complex ecosystem for local water in Taihu Lake [J]. China Environment Science (中国环境科学), 1998, 18(5): 410- 414 (in Chinese).
- [51] Peterjohn W T, D L Correll Nutrient dynamics in an agriculture watershed: observations on the role of a riparian forest [J]. Ecology, 1984, 65 (5): 1466- 1475
- [52] Meng Qinghua (孟庆华), Fu Bojie (傅伯杰). Landscape pattern and soil nutrient flow [J]. J. Soil and Water Con. (水土保持学报), 2000, 14(3): 116- 121 (in Chinese).
- [53] Huang Bingwei (黄秉维). Exactly estimated the function of forestry [J]. Geographical Knowledge (地理知识), 1981, (1): 1- 3 (in Chinese).
- [54] Huang Bingwei (黄秉维). On the function of forestry again [J]. Geographical Knowledge (地理知识), 1981, (2): 1- 3; (3): 1- 3 (in Chinese).