

黄河中游大尺度植被冠层截留降水模拟与分析

宋文龙^{1,2}, 杨胜天¹, 路京选², 刘昌明³, 王树东⁴

(1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 遥感科学国家重点实验室,

环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875;

2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044;

3. 中国科学院陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101;

4. 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要: 大尺度植被冠层截留降水定量模拟与分析是揭示气候变化和人类活动综合作用下区域水沙变化机制的重要研究内容。以黄河中游河口镇—潼关区间为研究区, 耦合遥感等空间数据与植被冠层截留估算模型, 利用地面监测站点降水数据、GLASS叶面积指数遥感数据和地理信息空间分析技术, 定量模拟和分析了黄河中游20世纪80年代以来3个典型年份的地表植被冠层截留降水及其时空变化特征。结果表明: (1) 20世纪80年代以来, 特别是20世纪末实施的生态修复政策, 使得黄河中游叶面积指数显著提高, 植被覆盖明显改善; (2) 20世纪80年代以来, 黄河中游植被冠层截留降水发生了明显变化, 1984年、1995年和2010年研究区植被冠层截留降水量区域年平均值分别为19.57 mm、13.66 mm和22.68 mm, 截留率分别为3.24%、3.32%和4.92%; (3) 黄河中游植被冠层截留降水特征及其变化受降水特征和地表植被状况共同影响, 其中, 降水量是决定植被冠层截留降水特征的控制性因素, 而叶面积指数年际变化是影响植被冠层截留降水特征变化的主要因素。

关键词: 黄河中游; 降水; 叶面积指数; 植被冠层截留; 遥感

DOI: 10.11821/dlxb201401008

1 引言

植被冠层截留降水过程是水循环过程的重要环节。植被冠层对降水的阻拦和截留作用将降水分为冠层截留、干流和穿透降水, 是降水再分配的首个环节, 既在不同程度上影响到达地面的降水量空间分布, 进而影响土壤入渗、产流等水循环过程, 又通过叶片与降水的相互作用影响雨滴能量, 进而影响土壤侵蚀过程^[1-3]。因此, 开展植被冠层截留降水定量模拟研究对揭示气候变化和人类活动综合作用下的地表植被变化对区域产水产沙过程的影响机制十分必要^[4]。

定量模拟与分析20世纪80年代以来大尺度植被冠层截留降水及其时空变化特征对于解析黄河水资源分配和水环境演变具有积极意义。20世纪80年代以来, 在气候变化和人类活动的综合作用下, 黄河水沙环境发生了显著改变, 水沙锐减成为黄河治理面临的重要科学问题^[5-6], 而土地利用等下垫面改变正是水沙环境改变的重要内容。研究表明, 20世

收稿日期: 2013-10-05; 修订日期: 2013-11-07

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划 (2012BAB02B00); “863”项目 (2012AA12A309; 2013AA12A302); 中国水科院专项; 水利部公益性行业科研专项项目 (200901022-01) [Foundation: National Key Technologies R&D Program, No.2012BAB02B00; Special Fund from the China Institute of Water Resources and Hydropower Research; Public Welfare Foundation of the Ministry of Water Resources of China, No.200901022-01]

作者简介: 宋文龙 (1983-), 男, 博士, 主要从事水资源与水环境遥感研究。E-mail: swl198301@163.com

通讯作者: 杨胜天 (1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源与水环境遥感研究。

E-mail: yangshengtian@bnu.edu.cn

纪80年代以来,作为黄河主要沙源地的黄土高原土地利用状况发生了显著改变,区域植被覆盖明显好转,特别是20世纪末大力推行的退耕还林、生态修复等水土保持生态建设政策发挥了积极作用^[7-9]。在大范围植被覆盖变化条件下,尤其作为植被对水循环和土壤侵蚀影响的关键环节,20世纪80年代以来大尺度植被冠层截留降水及其时空变化特征在水沙变化及其影响机制研究中占有特殊地位。

耦合空间数据和定量模型进行定量模拟与分析成为大尺度植被冠层截留降水研究的迫切需求与可靠途径。植被冠层截留降水过程受到诸多因素的影响,主要包括降水量、降水特性、冠层特征、雨前冠层湿润程度、气象条件等^[10-11]。对植被冠层截留的研究方法主要包括实验观测和模型模拟两种途径,前者主要包括室内浸泡、野外观测与数据回归统计等方法^[12],后者主要包括统计模型、概念模型和解析模型,如Horton模型、Rutter模型、Liu模型和Gash解析模型等^[13-14]。但是受限于研究方法及模型参数的难以获取,大尺度估算植被冠层截留降水的研究较少。国内外研究表明,植被冠层截留能力及截留量与植被盖度和叶面积指数具有密切联系,并建立了植被冠层截留能力与叶面积指数的计算关系^[15-16],其中Aston (1979)通过模拟实验研究了植被冠层截留过程,并建立了植被冠层截留量与叶面积指数的定量关系模型,得到认可和应用^[17]。A.P.J.DE ROO (1994)基于地理信息系统技术,在具有物理机制的LISEM土壤侵蚀模型中应用Aston模型和植被冠层截留能力公式,利用叶面积指数和降雨量来估算植被累计降水截留量,为应用遥感等空间数据估算植被冠层截留量做了有益尝试^[18]。近年来遥感技术的发展,实现了对地大尺度无缝连续观测,使得包括叶面积指数在内的陆面区域参数获取成为可能,为气候模型、地—气相互作用过程、生态水文过程等模型提供了数据支持^[19-20]。因此,遥感等空间信息数据与植被冠层截留模型的耦合,将成为区域大尺度植被冠层截留降水定量估算的可靠途径之一。

2 研究区

黄河中游河口镇—潼关区间是黄河水沙锐减研究的关键区域(图1)。该区间位于104°00′~112°30′E, 33°30′~41°00′N范围,地跨山西省、内蒙古自治区、陕西省、甘肃省、宁夏回族自治区五省(自治区),东以吕梁山为界,南邻秦岭,包括渭河、泾河、北洛河、延河、无定河等30个子流域,总面积24万km²。研究区位于干旱向半干旱半湿润气候过渡区,属于大陆性季风气候,降水空间分异较大。地形起伏,主要地貌包括黄土丘陵沟壑区、残塬区、西北风沙区、黄土阶地区、河谷冲击平原区、土石山区等类型。植被由北向南依次由草原植被向温带、暖温带落叶阔叶林带过渡。研究区位于黄土高原主体区,大部覆盖深厚黄土,地表组成物质抗侵蚀、抗冲性差,易遭侵蚀,风蚀和水蚀均比较严重,水土流失问题突出,是黄河中下游泥沙的主要来源区,也是治理和防治黄河流域水土流失的关键和敏感区。

20世纪80年代以来,黄土高原水土保持工作经历了小流域治理、“四荒”拍卖、《水

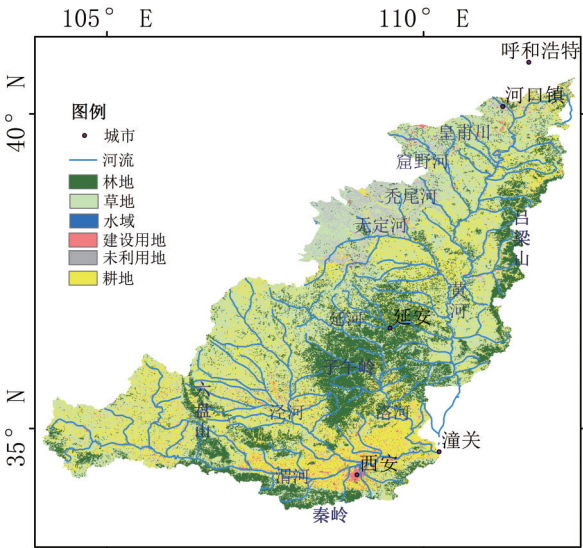


图1 黄河中游河口镇—潼关区间研究区
Fig. 1 The study area of Hekouzhen-Tongguan region in the middle reaches of Yellow River

是黄河中下游泥沙的主要来源区,也是治理和防治黄河流域水土流失的关键和敏感区。

水土保持法》颁布、退耕还林和封山禁牧等水土保持生态建设政策、措施的发展变迁,水土保持工作取得了很大成绩,特别是从20世纪末大力推广的生态修复政策,使得研究区土地利用发生了显著变化,植被覆盖度明显提高^[21]。研究表明,20世纪90年代相比于80年代,黄土高原植被覆盖有所提高^[22],总体上耕地面积在减少,林灌面积在增加,但幅度有限,改善趋势不明显^[23],存在边治理边破坏现象;生态修复政策的大范围推广实施,使得21世纪第一个10年植被恢复取得了历史性突破,土地利用变化显著,区域内植被覆盖明显改善^[24]。

3 方法与数据

3.1 方法

3.1.1 降水特征近似年筛选 考虑到影响年内植被生长和植被冠层截留过程的降水特征,选择区域年均面雨量、降水月际分布、暴雨发生及其空间分异特征等3个参考指标,以其最接近作为近似年筛选的标准,以2010年为现状年,分别从20世纪80年代和90年代筛选出与现状年降水特征最为近似的典型年份。筛选过程如下:以2010年为现状年,首先计算1980-2011年区域年均面雨量及其与现状年距平百分率,分别从20世纪80年代和90年代选择距平百分率最小的数个年份;对于初选出的数个年份与现状年,继而统计分析其面雨量月际分布,剔除与现状年差异大的年份;对于剩下的年份,统计分析暴雨量及其空间分异特征,最后确定降水特征近似年。

3.1.2 植被冠层截留降水量 由于A.P.J.DE ROO等构建的植被冠层截留模型^[18],是基于叶面积指数和降水量来估算植被冠层截留量,其中叶面积指数可通过遥感数据获得,降水量可通过气象站点监测数据插值获得,适用于大尺度植被冠层截留降水估算。基于降雨截流量(S_v)与降雨量(P_{cum})的理论关系,即 $P_{cum}=0$ 时, $S_v=0$,当 $P_{cum} \rightarrow \infty$ 时, S_v =最大截量(S_{max}),我们可采用以下的降雨截留公式

$$S_v = S_{max} \times \left[1 - e^{-\eta \frac{P_{cum}}{S_{max}}} \right] \quad (1)$$

$$\eta = 0.040 \times LAI \quad (2)$$

$$S_{max} = 0.935 + 0.498 \times LAI - 0.00575 \times LAI^2 \quad (3)$$

式中: S_v 为累计植被冠层截留降水量(mm), P_{cum} 为累计降水量(mm), S_{max} 为植被冠层最大截留能力(即截留容量,mm), η 为校正系数, LAI 为叶面积指数。

3.1.3 植被冠层降水截留率 植被冠层降水截留率通过下式计算得到:

$$a = \frac{S_v}{P_{cum}} \times 100 \quad (4)$$

式中, a 为植被冠层降水截留率(%), S_v 为累计植被冠层截留降水量(mm), P_{cum} 为累计降水量(mm)。

3.2 数据来源

3.2.1 降水数据 降水数据来自中国地面气候资料年值、月值和日值数据集(下载自中国气象科学数据共享服务网,网址 <http://cdc.cma.gov.cn/home.do>),包括甘肃(9个站点)、河南(1个站点)、内蒙古(10个站点)、宁夏(9个站点)、山西(11个站点)、陕西(6个站点)和四川(1个站点)共计7省(自治区)47个中国基本、基准地面气象观测站点的1984年、1995年和2010年年降水量、月降水量和20~20 h日降水量数据,数据精度0.1 mm,来源于各省、市、自治区气候资料处理部门逐月上报的《地面气象记录月报表》信息化资料。利用ARCGIS反距离加权插值批处理算法,将点上降水量插值生成面雨量空间数据。

3.2.2 叶面积指数(LAI)遥感数据 对于20世纪80年代以来的叶面积指数遥感数据获

取, 考虑到早期遥感数据分辨率较低, 且不同数据源产品的不确定性使其可比性难以保证, 文中采用北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院提供的GLASS数据LAI产品(网址 <http://glass-product.bnu.edu.cn>), 该产品通过多种LAI产品的融合模块和集成时间序列数据的LAI反演模块, 利用AVHRR、MODIS等数据和GRNN网络生产得到了1982年以来时间序列上平滑连续且精度优于现有LAI全球产品的LAI数据集(采用SIN投影, 空间分辨率为1 km, 时间分辨率为8天, 有效值范围0~100, 单位 m^2/m^2 , 系数0.1)。利用MODIS数据批处理工具将研究区经纬度范围内的LAI数据以经纬度投影输出, 并采用线性插值得到LAI日数据, 再以研究区边界裁剪, 最终得到研究区内日尺度LAI数据, 空间分辨率 0.01° 。

4 分析结果

20世纪80年代、90年代和2010现状年代表了黄河中游近30年来在相关治理政策和措施实施下土地利用转移和植被覆盖变化的主要特征^[21]。综合考虑年降水量、降水月际分布、暴雨事件等降水特征的近似性, 首先从20世纪80年代和90年代筛选出1984年和1995年作为与2010年现状年降水特征较为近似的典型年份, 以最大程度减少降水差异对地表植被生长的影响; 然后构建遥感数据驱动的植被冠层截留模型, 并应用国家气象站点日降水观测数据和公共平台LAI遥感产品, 基于ARCGIS空间插值和ENVI图像处理技术, 定量模拟黄河中游典型年份植被冠层截留降水量; 进而分析20世纪80年代以来研究区植被冠层截留降水变化及空间特征。

4.1 典型年份面雨量变化时空特征

作为降水特征较为近似的年份, 面雨量依然存在时空差异。研究区降水空间分布总体呈现西南—东北条带状区域分异特征, 且由东南向西北方向递减。对研究区面雨量进行统计, 结果表明1984年、1995年和2010年面雨量区域年平均值分别为498.10 mm、425.90 mm和453.47 mm。比较3个典型年份的面雨量空间数据, 得到1984年、1995年和2010年研究区面雨量空间变化图(图2)。由图2可知, 1995年与1984年相比(见图2a), 研究区东北部即无定河中下游以北诸流域降水增加, 降水量增加范围介于0~150 mm, 流域其他区域均普遍减少, 且越往东南部较湿润地区减少越多, 减少范围介于0~400 mm; 2010年与1995年相比(见图2b), 流域东北部即无定河流域以北、西北边缘较干旱区域包括北洛河、泾河和渭河上游降水量减少, 减少范围介于0~130 mm, 其他区域降水量增加, 且越往东南部较湿润地区增加越多, 增加范围介于0~430 mm; 2010年与1984年相比(图2c),

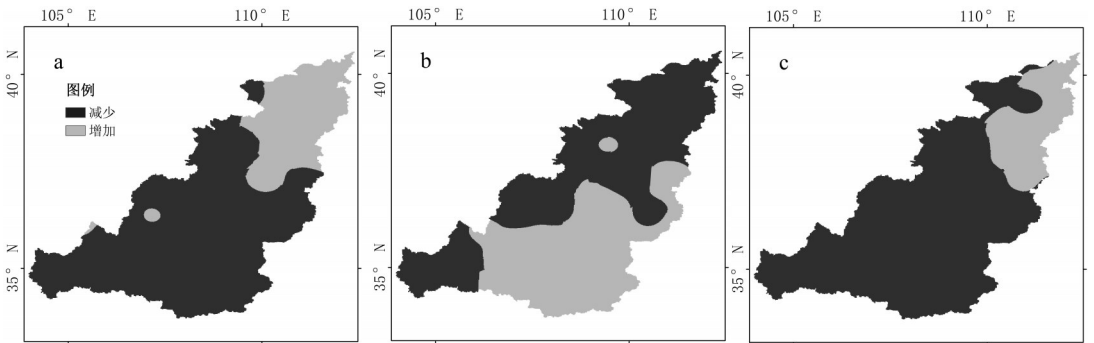


图2 研究区面雨量空间变化图 (a、b、c分别为1995年较1984年、2010年较1995年、2010年较1984年的面雨量空间变化图)

Fig. 2 Spatial change map of precipitation in the study area (1995 over 1984 (a), 2010 over 1995 (b), and 2010 over 1984(c))

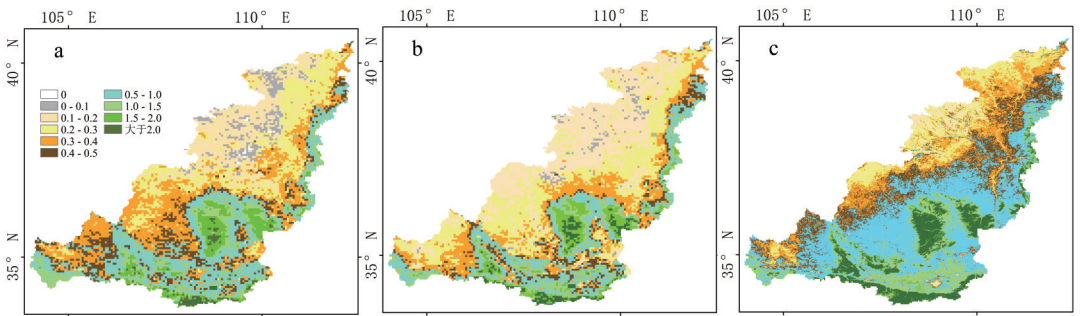


图3 年均叶面积指数空间分布图 (1984年 (a), 1995年 (b), 2010年 (c))

Fig. 3 Yearly average LAI map in 1984 (a), 1995 (b) and 2010 (c)

只有东北部降水量略微增加, 增加范围介于0~80 mm, 流域大部降水量均减少, 减少范围介于0~150 mm, 总体越往南部降水减少越多。

4.2 典型年份叶面积指数时空特征

根据研究区1984年、1995年和2010年年均叶面积指数空间分布(图3), 统计得到其区域年均叶面积指数分别为0.57、0.53和0.78。参考典型土地利用对应的植被覆盖度范围, 图中将年均叶面积指数值划分为10个等级(即0~0.10、0.10~0.20、0.20~0.30、0.30~0.40、0.40~0.50、0.50~1.00、1.00~1.50、1.50~2.00和大于2.00), 以反映研究区地表植被和覆盖度变化特征。由图3可知, 整体上秦岭、六盘山、子午岭、吕梁山等山地林区以及研究区东南部泾渭河谷地冲击平原区, 植被叶面积指数值较大, 山地林区年均叶面积指数在1.00以上, 泾渭河谷地冲击平原区年均叶面积指数主要分布在0.50~1.00范围; 往西北方向黄土高原丘陵沟壑区, 疏林、灌草地及耕地居多, 降水减少, 植被叶面积指数减小至0.50以下; 毛乌素沙地边缘, 植被稀少, 叶面积指数最小。同时, 3个典型年份叶面积指数在研究区内具有显著的时空变化特征, 1995年与1984年相比, 区域叶面积指数整体变化不大, 但在区域上表现出增大与减小同时存在, 西北部较干旱低植被覆盖(叶面积指数介于0~0.10范围)区域、泾渭河流域中上游大部分区域及北洛河下游区域叶面积指数有所减小, 北洛河流域上游和延河流域叶面积指数有所增大; 2010年与1984年和1995年相比, 研究区范围内叶面积指数普遍增大, 特别是叶面积指数介于0.10~0.50范围的区域, 集中发生在泾渭河、北洛河和延河中下游地区, 与其他学者指出的耕地面积先少许增加后大幅减少, 草地面积先减少后大幅增加, 林地面积增加等研究成果是一致的^[25-26]。

4.3 典型年份植被冠层截留降水时空特征

4.3.1 植被冠层截留降水量 由1984年、1995年和2010年研究区植被冠层累计截留降水量空间分布图(图4), 统计得知3个典型年研究区植被冠层截留降水量区域年平均值分别为19.57 mm、13.66 mm和22.68 mm。考虑到降水、地表植被和地形地貌综合影响, 依

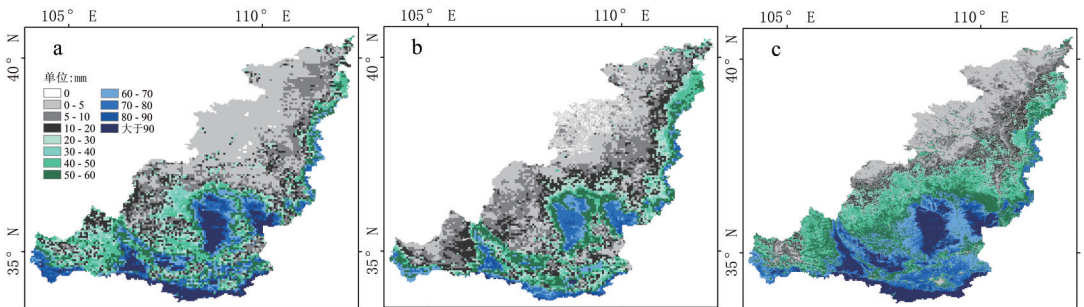


图4 植被冠层累计截留降水量空间分布图 (1984年 (a), 1995年 (b), 2010年 (c))

Fig. 4 Map of yearly accumulative canopy interception quantity in 1984 (a), 1995 (b) and 2010 (c)

表1 研究区分区域植被冠层截留量及其变化 (↓表示减少, ↑表示增加)
Tab. 1 Vegetation canopy interception and its changes in different regions
(↓ means decrease, and ↑ means increase)

区域	植被冠层截流量 (mm)		
	1984年	1995年	2010年
I秦岭、六盘山、子午岭和吕梁山等山地林区	20~60	20~50↓	大于50↑
II泾渭河下游冲击平原区	10~30	小于20↓	20~50↑
III渭河中上游、泾河中游和北洛河中游地区	10~20	小于10↓	20~40↑
IV渭河、泾河和北洛河上游部分区域、延河流域和无定河流域及其以北区域	小于10	小于10↓	0~20↑

据植被冠层截留降水量及其变化, 研究区植被冠层累计截留降水量空间分布可分为四个等级区域 (表1):

I秦岭、六盘山、子午岭和吕梁山等山地林区。1984年, 植被冠层累计截留降水量大部分区域介于20~60 mm, 子午岭和秦岭部分区域大于60 mm; 1995年, 植被冠层累计截留降水量总体分布介于20~50 mm, 与1984年相比有所减少; 2010年, 植被冠层累计截留降水量显著增加, 除吕梁山外, 大部分区域植被冠层累计截留降水量大于50 mm。

II泾渭河下游冲击平原区。1984年, 大部分区域植被冠层累计截留降水量介于10~30 mm, 部分区域大于30 mm; 1995年, 大部分区域植被冠层截留降水量低于20mm, 部分区域界于小于10 mm, 与1984年相比明显减少; 2010年, 植被冠层累计截留降水量显著增加, 除城市用地外, 区域植被冠层累计截留降水量介于20~50 mm。

III渭河中上游、泾河中游和北洛河中游地区。1984年, 大部分区域植被冠层截留降水量介于10~20 mm; 1995年, 大部分区域植被冠层累计截留降水量均低于10 mm, 与1984年相比明显减少; 2010年, 大部分区域植被冠层累计截留降水量在20~40 mm范围, 增加趋势尤其显著。

IV渭河、泾河和北洛河上游部分区域、延河流域和无定河流域及其以北区域。1984年, 植被冠层截留降水量绝大部分区域均低于10 mm; 1995年, 大部分区域植被冠层累计截留降水量均低于10 mm, 与1984年相比明显减少, 只有部分区域略微增加; 2010年, 植被冠层累计截留降水量显著增加, 大部分区域植被冠层累计截留降水量介于0~10 mm, 介于10~20 mm的区域也占到一定比例。

4.3.2 植被冠层降水截留率 根据1984年、1995年和2010年研究区内植被冠层降水截留率空间分布图 (图5) 的统计结果表明, 研究区在该3个年份的植被冠层降水截留率区域年平均值分别为3.24%、3.32%和4.92%。由图5可知, 研究区内地表植被冠层年降水截留率在5%以下的区域所占面积最大, 在1984年和1995年分别占到研究区总面积的81.58%和79.80%, 主要分布在区域I以外的绝大部分区域, 而在2010年所占面积明显减少, 占到研究区总面积的63.76%, 主要分布在区域IV和区域II、III的部分区域; 地表植被冠层年降水截留率分布在5%~9%范围的区域, 在上述3个年份所占研究区面积比例分别为

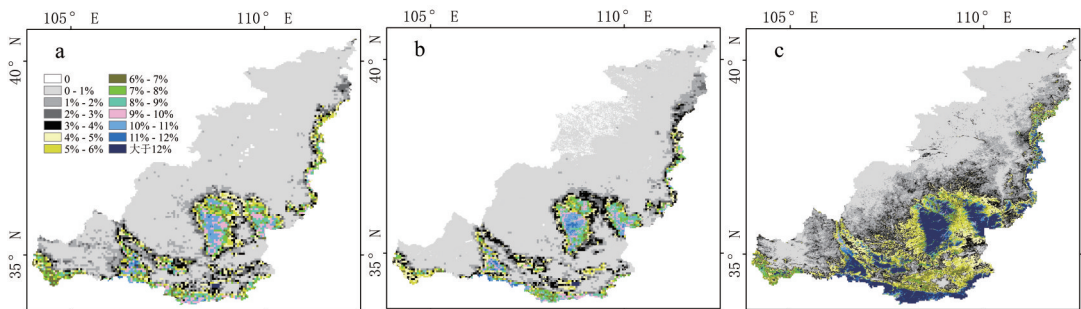


图5 植被冠层降水截留率空间分布图 (1984年 (a), 1995年 (b), 2010年 (c))

Fig. 5 Yearly interception rate map in 1984 (a), 1995 (b) and 2010 (c)

13.32%、12.43%和24.12%，1984和1995年主要分布在区域Ⅱ的部分地区和区域Ⅰ及其边缘地带，2010年则拓展到区域Ⅱ和Ⅲ的大部分区域；地表植被冠层年降水截留率大于10%的区域集中分布在区域Ⅰ山地林区。可见，1984年、1995年和2010年研究区地表植被冠层年降水截留率依次增大，其中前两年变化不大，2010年增大显著，主要体现在植被冠层降水截留率在5%以下的区域向5%~9%数值范围转化，空间上分布在区域Ⅱ和Ⅲ的大部分区域以及区域Ⅳ南部的部分区域。

5 讨论

5.1 耦合遥感数据的植被冠层截留模型适用性讨论

1984年、1995年和2010年研究区内区域Ⅰ山地林区植被冠层年降水截留率主要分布均大于10%，2010年更是大于12%（图3），与石培礼等指出的我国各类森林生态系统的林冠截留率平均值为 $19.85\% \pm 7.16\%$ 规律是相符的，也与刘世荣等指出的我国各类森林生态系统截留率平均值变动在11.4%~36.5%范围一致^[27]。王彦辉等通过野外观测和模型模拟研究了2004-2005年六盘山主要森林类型的植被冠层截留率，指出其范围在8.59%~17.94%^[28]，也与文中模拟结果相符。可见，耦合遥感等空间数据的植被冠层截留模型，可进行大尺度植被冠层截留估算，结果精度可靠。但模型仅采用对植被冠层截留影响较大的两个因素，实际情况还应受到其他因素影响，有待于开展野外观测试验，进行机制研究，优化模型参数。

5.2 降水特征近似年筛选及其合理性讨论

20世纪80年代、90年代和21世纪第一个10年代表了20世纪80年代以来土地利用和植被覆盖等下垫面变化的3个特征时段，每个时段内的下垫面变化特征较为一致，时段间具有明显差异。由于降水特征对地表植被生长及其截留具有重要影响，因此在下垫面变化的3个特征时段（2010年为现状年）选择降水特征近似年份显得尤为必要，以最大程度上减少降水差异对当年植被生长及其截留特征的影响，对上述降水特征近似典型年份开展植被冠层截留估算才可反映下垫面变迁主要特征时期下垫面植被截留特征及其差异。

文中筛选出1984年和1995年作为与2010现状年降水特征最为近似的典型年份。在当年实际降水情况下，3个典型年份的实际植被冠层截留区域年平均值分别为19.57 mm、13.66 mm和22.68 mm；为消除降水差异带来的影响，以2010年日降水量数据为控制性输入数据，分别模拟地表植被叶面积指数为1984年、1995年地表状况时的植被冠层截留降水量，区域年平均值分别为17.12 mm和15.42 mm，与实际截留量相比分别仅减少2.45 mm和增加1.76 mm，因此筛选出的典型年份降水差异对植被截留的影响有限，文中筛选结果合理。但由于可利用的地面气象站点数量有限，限制了面雨量数据质量。

5.3 区域植被冠层截留降水时空特征影响因素讨论

由植被冠层截留降水量和截留率计算公式可知，降水和地表植被叶面积指数是文中影响区域植被冠层截留降水时空特征的因素。通常在研究区内，降水量越大，叶面积指数越大，植被冠层截留降水量越多，两者的时空特征与变化共同决定着研究区内地表植被冠层截留降水及其变化时空特征。

降水差异在很大程度上影响地表植被生长，并与之共同影响植被截留特征。图2、图3和图4表明叶面积指数、植被截留降水量与降水具有大的空间相关性，即从东南向西北方向递减。同时，1995年植被冠层截留降水量比其他两个年份减少较多，究其原因除了该年平均面雨量数值最少，降水空间变化特征是重要影响因素，尤其是东南部包括六盘山、子午岭和秦岭等植被盖度较高、降水截留率较大的降水较丰沛地区，降水量减少较多；而较干旱的区域Ⅳ，1995年植被冠层截留降水量多于1984年，则受到该区域降水量比1984年偏丰的影响。

叶面积指数时空特征及其变化是影响植被冠层截留降水的重要因素。图3、图4和图5表明,叶面积指数空间分布特征与植被冠层截留降水量和截留率具有较好的空间相关性。2010年区域总降水量少于1984年,且减少区域主要分布在植被较好地区(图2c),而2010年的植被截留降水量和截留率却明显高于1984年,这主要受到2010年研究区内叶面积指数普遍升高的影响(图3c)。由图3可知,研究区内叶面积指数具有显著的时空变化特征,特别是叶面积指数介于0.10~0.50范围的区域,集中发生在泾渭河、北洛河和延河中下游地区,结合图4和图5可知,2010年植被冠层截留量、截留率增加及其空间特征与叶面积指数升高及其空间分布较为一致。可见叶面积指数年际变化对植被截留降水量和截留率的变化影响显著,超过了年际降水差异的影响。因此,黄河中游的植被修复努力显著增大了植被叶面积指数,对植被冠层截留降水量增加影响显著,对于水沙锐减机制研究具有积极贡献。但由于黄河中游大尺度区域植被截留定量估算研究不足,模型模拟结果难以得到全区域验证,文中仅就山地林区模拟结果与其他学者相关研究进行了对比。

6 结论

在降水特征近似年筛选的基础上,应用耦合遥感数据的植被冠层截留模型,以2010年为现状年,对20世纪80年代以来下垫面条件特征时段的植被冠层截留降水进行了模拟与分析,得到如下结论:

(1) 20世纪80年代以来黄河中游地表植被在变化中显著改善。1984年、1995年和2010年的叶面积指数(LAI)遥感信息表明,研究区区域年均叶面积指数分别为0.57、0.53和0.78,20世纪80年代以来土地利用经历了由低植被覆盖向高植被覆盖转化的变化过程,其中,90年代与80年代相比,治理与破坏现象并存,而得益于生态修复政策,21世纪第一个10年地表植被覆盖明显改善,区域年均叶面积指数增加了近0.2。

(2) 20世纪80年代以来黄河中游植被冠层截留降水发生明显变化。1984年、1995年和2010年研究区植被冠层截留降水区域年平均值分别为19.57 mm、13.66 mm和22.68 mm,植被冠层降水截留率区域年平均值分别为3.24%、3.32%和4.92%。

(3) 地表植被(文中采用叶面积指数作为表征)变化是影响植被截留特征年际差异的主要因素。得益于植被修复和生态建设政策的实施,21世纪第一个10年地表叶面积指数的明显提高增加了研究区内植被冠层截留降水量和截留率,是影响特别是21世纪以来植被冠层截留降水增加的重要原因,进而影响降水分配与水循环过程。

参考文献 (References)

- [1] Bao Wen, Bao Weikai, He Binghui et al. Interception effects of forest ecosystems to precipitation: A review. *Journal of Mountain Science*, 2004, 22(4): 483-491. [鲍文, 包伟楷, 何丙辉 等. 森林生态系统对降水的分配与拦截效应. *山地学报*, 2004, 22(4): 483-491.]
- [2] Shi Peili, Li Wenhua. Influence of forest cover change on hydrological process and watershed runoff. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 481-487. [石培礼, 李文华. 森林植被变化对水文过程和径流的影响效应. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 481-487.]
- [3] Liu Xiangdong, Wu Qinxiao, Zhao Hongyan. The vertical interception function of forest vegetation and soil and water conservation. *Research of Soil and Water Conservation*, 1994, 1(3): 8-13. [刘向东, 吴钦孝, 赵鸿雁. 森林植被垂直截留作用与水土保持. *水土保持研究*, 1994, 1(3): 8-13.]
- [4] Fan Shixiang, Gao Yan, Cheng Yincui et al. Rainfall-intercepting capability of forest canopy. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(2): 200-204. [范世香, 高雁, 程银才 等. 林冠对降雨截留能力的研究. *地理科学*, 2007, 27(2): 200-204.]
- [5] Li Guoying, Sheng Lianxi. Model of water-sediment regulation in Yellow River and its effect. *Sci China Tech Sci*, 2011, 54: 924-930. [李国英, 盛连喜. 黄河调水调沙的模式及其效果. *中国科学: 技术科学*, 2011, 41(6): 826-832]

- [6] Li Guoying. Theory and practice of temporal and spatial dispatch of water and sediment in middle-lower reaches of Yellow River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, (8): 1-7. [李国英. 黄河中下游水沙的时空调度理论与实践. *水利学报*, 2004, (8): 1-7.]
- [7] Li Wenhua L. Degradation and restoration of forest ecosystems in China. *Forest Ecology and Management*, 2004, 201 (1): 33-41.
- [8] Bennett M T. China's sloping land conversion program: Institutional innovation or business as usual? *Ecological Economics*, 2008, 65(4): 699-711.
- [9] Wang G, Innes J L, Lei J et al. China's forestry reforms. *Science*, 2007, 318(5856): 1556.
- [10] Cui Qiwu, Bian Lugang, Shi Jide et al. Rainfall interception of forest canopy. *Scientia Silvae Sinica*, 1980, (2): 141-146. [崔启武, 边履刚, 史继德 等. 林冠对降水的截留作用. *林业科学*, 1980, (2): 141-146.]
- [11] Wang Aijuan, Zhang Wenbo. Reviews of vegetation interception of rainfall. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(4): 55-59. [王爱娟, 章文波. 林冠截留降雨研究综述. *水土保持研究*, 2009, 16(4): 55-59.]
- [12] Wang Wen, Zhuge Xuxia, Zhou Xuan. Methods for plant interception measurement. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2010, 38(5): 495-504. [王文, 诸葛绪霞, 周炫. 植被冠层截留观测方法综述. *河海大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(5): 495-504.]
- [13] Diao Yiwei, Pei Tiefan. Research advances in dynamic mechanism and its simulation of eco-hydrological process in forest catchment. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(12): 2369-2376. [刁一伟, 裴铁璠. 森林流域生态水文过程动力学机制与模拟研究进展. *应用生态学报*, 2004, 15(12): 2369-2376.]
- [14] Liu S G. Evaluation of the Liu model for predicting rainfall interception in forests word-wide. *Hydrological Process*, 2001, 15: 2341-2360.
- [15] Zhang Guanghui, Liang Yimin. A summary of impact of vegetation coverage on soil and water conservation benefit. *Research of Soil and Water Conservation*, 1996, 3(2): 104-110. [张光辉, 梁一民. 植被盖度对水土保持功效影响的研究综述. *水土保持研究*, 1996, 3(2): 104-110.]
- [16] Van Dijk A I J M, Bruijnzeel L A. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model (Part 1): Model description. *Journal of Hydrology*, 2001, 247(2001): 230-238.
- [17] Aston A R. Rainfall interception by eight small trees. *Journal of Hydrology*, 1979, 42: 383-396.
- [18] De Roo A P J, Wesseling C G, Cremers N H D T et al. LISEM: A new physically-based hydrological and soil erosion model in a GIS-environment, theory and implementation. *Variability in Stream Erosion and Sediment Transport (Proceedings of the Canberra Symposium, December 1994)*. IAHS Publ, 1994: 439-448
- [19] Buermann W, Dong J R, Zeng X B et al. Evaluation of the utility of satellite-based vegetation leaf area index data for climate simulations. *Journal of Climate*, 2001, 14(17): 3536-3550.
- [20] Yang Shengtian. *Ecohydrological Models: Introduction and Application*. Beijing: Science Press, 2012. [杨胜天. *生态水文模型与应用*. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [21] Wang Fei, Li Rui, Yang Qinke et al. Policy development of soil and water conservation in the Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(1): 103-107. [王飞, 李锐, 杨勤科 等. 黄土高原水土保持政策演变. *中国水土保持科学*, 2009, 7(1): 103-107.]
- [22] Wang Guangqian, Zhang Changchun, Liu Jiahong et al. Analyses on the variation of vegetation coverage and water/sediment reduction in the rich and coarse sediment area of the Yellow River Basin. *Journal of Sediment Research*, 2006, (2): 10-16. [王光谦, 张长春, 刘家宏 等. 黄河流域多沙粗沙区植被覆盖变化与减水减沙效益分析. *泥沙研究*, 2006, (2): 10-16.]
- [23] Zhang Xiaoping, Dong Bingrang, Li Rui et al. Study of land use and forest cover pattern change in Hekou-Longmen section of the middle reaches of Yellow River. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(5): 163-166. [张晓萍, 董冰让, 李锐 等. 黄河中游河龙区间土地利用与林地覆被格局变化研究. *水土保持学报*, 2007, 21(5): 163-166.]
- [24] Xin Zhongbao, Yu Xinxiao, Gan Jing et al. Vegetation restoration and its effects on runoff and sediment yield in Hekouzheng-Longmen section of the middle reaches of Yellow River. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31 (5): 1-7. [信忠保, 余新晓, 甘敬 等. 黄河中游河龙区间植被覆盖变化与径流输沙关系研究. *北京林业大学学报*, 2009, 31(5): 1-7.]
- [25] Li Gun, Liang Wei, Yang Qinke. Analysis of land use pattern change in coarse sandy region of middle reaches of Yellow River. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 73(4): 52-58. [李滚, 梁伟, 杨勤科. 黄河中游多沙粗沙区土地利用格局变化分析. *中国水土保持科学*, 2009, 73(4): 52-58.]
- [26] Song Fuqiang, Xing Kaixiong, Liu Yang et al. Monitoring and assessment of vegetation variation in northern Shaanxi based on MODIS/NDVI. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 354-363. [宋富强, 邢开雄, 刘阳 等. 基于MODIS/NDVI的陕北地区植被动态监测与评价. *生态学报*, 2011, 31(2): 354-363.]
- [27] Wen Yuanguang, Liu Shirong. Quantitative analysis of the characteristics of rainfall interception of main forest

ecosystems in China. *Scientia Silvae Sinica*, 1995, 31(4): 289-298. [温远光, 刘世荣. 我国主要森林生态系统类型降水截留规律的数量分析. *林业科学*, 1995, 31(4): 289-298.]

[28] Xu Lihong, Shi Zhongjie, Wang Yanhui et al. Canopy interception characteristics of main vegetation types in Liupan Mountains of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(10): 2487-2493. [徐丽宏, 时忠杰, 王彦辉 等. 六盘山主要植被类型冠层截留特征. *应用生态学报*, 2010, 21(10): 2487-2493.]

Simulation and analysis of vegetation interception at a large scale in the middle reaches of Yellow River

SONG Wenlong^{1,2}, YANG Shengtian¹, LU Jingxuan², LIU Changming³, WANG Shudong⁴

- (1. School of Geography, Beijing Normal University, State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing 100875, China;
2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;
3. Key Laboratory of Land Water Cycle and Surface Process, CAS, at IGSNRR, Beijing 100101, China;
4. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Quantitative simulation and analysis of vegetation canopy interception in a large scale is of great significance to reveal water-sediment changing mechanism under combined influences of climate change and human activities. Hekouzhen-Tongguan region in the middle reaches of the Yellow River was taken as the study area. Quantity of vegetation canopy interception in 1984, 1995 and 2010 were simulated by using models coupled with spatial data such as remote sensing data. The main data used in the study include precipitation data from weather stations and GLASS- LAI remote sensing data. Results show that vegetation coverage has increased since the 1980s, especially since the end of 1990s due to ecological restoration policy. And vegetation canopy interception has varied since the 1980s. The average yearly precipitation intercepted by canopy in 1984, 1995 and 2010 were 19.57 mm, 13.66 mm and 22.68 mm respectively, with the interception rate of 3.24%, 3.32% and 4.92% accordingly. It is found that vegetation canopy interception has been influenced by precipitation characteristics and vegetation synthetically in the study area, where precipitation plays a determinant factor. And LAI is the main factor affecting yearly vegetation interception variation since the 1980s.

Key words: the middle reaches of Yellow River; precipitation; leaf area index (LAI); vegetation canopy interception; remote sensing