植被恢复对黄土高原局地降水的反馈效应研究

张宝庆¹, 田磊^{1,2}, 赵西宁^{3*}, 吴普特³

1. 兰州大学资源环境学院, 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;

2. 兰州大学黄河流域绿色发展研究院, 兰州 730000;

3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

* 通讯作者, E-mail: zxn@nwsuaf.edu.cn

收稿日期: 2020-10-12; 收修改稿日期: 2021-01-29; 接受日期: 2021-03-02; 网络版发表日期: 2021-04-28

国家重点研发计划项目(批准号: 2020YFA0608403)和国家自然科学基金项目(批准号: 42022001、41877150、42041004和42001029)资助

摘要 自开展大规模植被恢复以来, 黄土高原大量坡耕地被转化为草地和林地, 其植被覆盖状况得到了显著改善. 然而, 大规模植被恢复通过改变下垫面性质导致大气与地表间的能量和水分循环过程发生变化, 进而对区域气候和局地降水产生反馈. 如何定量评估该反馈效应是水文气象学领域亟需解决的重要科学问题. 本研究通过构建考虑植被动态变化的陆气双向耦合模式, 分析黄土高原不同土地利用类型和地表参数的时空变化趋势, 在考虑植被恢复对流域水热循环和陆气交互作用影响的基础上, 定量评估植被建设对黄土高原局地降水的反馈效应, 并阐明其作用机理. 通过设立考虑植被恢复的真实情景和不考虑植被恢复的假设情景两组模拟试验, 对比分析植被建设对局地降水过程的净影响. 结果表明, 植被恢复对黄土高原局地降水量的增加具有积极效应. 观测数据显示, 2000~2015年黄土高原降水量以 7.84mm a^{-2} 的速率显著增加, 模拟结果显示大规模植被恢复对研究区降水量增加速率的贡献约为37.4%, 而外部水汽环流变化对研究区降水量增加速率的贡献约占62.6%. 考虑植被恢复情景比不考虑植被恢复情景下的黄土高原年均降水量高12.4%. 上述研究结果对黄土高原生态保护和高质量发展, 以及植被建设的可持续性管理具有重要的理论与现实意义.

关键词 陆气耦合模拟, 植被恢复, 水量平衡, 水文气象, 生态水文

1 引言

为改善黄土高原植被覆盖状况, 治理水土流失, 国家自1999年开始实施退耕还林(草)工程. 该工程实施20年来, 大量坡耕地被转化为草地和林地, 植被恢复效果显著(张宝庆等, 2011), 黄河流域产沙量大幅降低(王光谦等, 2006; 胡春宏等, 2008; Chen等, 2015; 杨大文等, 2015; Wang等, 2016; Zhang等, 2016). 大规模植

被恢复会通过改变下垫面条件影响大气与地表间的水量和能量平衡关系, 引起蒸散发、土壤入渗、地表径流、净辐射、感热和潜热通量等水热要素的变化, 改变陆面与大气间的交互作用强度, 进而对区域气候与局地降水过程产生反馈作用(杨大文等, 2015; 汤秋鸿, 2020). 如何定量分析黄土高原植被恢复对区域气候与局地降水的反馈效应, 成为新时代背景下保障植被建设可持续健康发展亟需解决的科学问题(Wang等,

中文引用格式: 张宝庆, 田磊, 赵西宁, 吴普特. 2021. 植被恢复对黄土高原局地降水的反馈效应研究. 中国科学: 地球科学, 51(7): 1080–1091, doi: 10.1360/SSTe-2020-0273

英文引用格式: Zhang B, Tian L, Zhao X, Wu P. 2021. Feedbacks between vegetation restoration and local precipitation over the loess plateau in China. Science China Earth Sciences, 64(6): 920–931, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9751-8>

2011; Su和Fu, 2013; Feng等, 2016).

探明黄土高原土地利用类型的转变方向, 分析植被覆盖状况的改善程度和影响地表水量平衡关键植被、地表参数的时空变化趋势, 是定量评估大规模植被恢复的区域气候效应的基础. 黄土高原植被建设主要是采用退耕还林(草)、封山育林(草)以及荒山造林(草)等具体措施, 其直接影响体现在三方面: (1) 土地利用类型的转变; (2) 影响地表水量平衡的关键植被参数的变化, 包括叶面积指数(leaf area index, *LAI*)和植被覆盖度等; (3) 影响能量平衡过程的关键地表参数的变化, 主要体现为地表反照率的改变(任宏昌等, 2014; Liang等, 2015). 目前, 关于大规模植被恢复的区域水文效应研究方面, 主要是利用遥感反演得到土地利用类型、*LAI*、植被覆盖度与地表反照率, 分析其时空变化趋势, 并将其代入离线的陆面过程模型或分布式水文模型中, 探讨其对模型模拟结果的影响. 然而, 现有研究往往忽略了陆面过程对区域气候的反馈作用, 有关植被和地表参数变化对陆气交互作用和局地降水影响方面的研究较为薄弱(肖志强等, 2008; 任宏昌等, 2014).

Chen等(2015)、Liang等(2015)、Wang等(2016)、Feng等(2016)和Zhang等(2016)诸多研究表明, 进入21世纪以来, 黄土高原植被变绿趋势显著, 地表覆盖状况得到了明显改善, 但是在植被恢复的同时也产生了显著的地表水分效应: 黄土高原蒸散耗水量急剧上升, 其径流系数大幅下降, 黄河流域径流量锐减, 区域水资源供需矛盾进一步加剧, 部分区域植被恢复强度已经达到了极限, 若进一步增加植被建设强度, 将会产生土壤干燥化、植被退化和水资源过度消耗等新的生态问题(王飞等, 2018; 杨磊等, 2018). 此外, 除上述地表水分效应外, 黄土高原大规模植被恢复将通过影响陆气间物质和能量传输与交换过程, 对区域气候产生反馈作用(改变大气中水分和能量平衡关系), 区域气候的改变将进一步影响地表水分和能量分配, 引起陆气交互作用强度发生改变, 进而对局地降水、蒸散发、植被截留和土壤入渗等水文过程产生新的影响(Gibbard等, 2005; 刘纪远等, 2011; Wen等, 2012; Wu和Zhang, 2013; Hirsch等, 2014; Hu等, 2015). 因此, 如何在考虑陆气交互作用强度改变基础上定量评估大规模植被恢复对局地降水的反馈效应是亟待研究的重要科学问题.

陆气双向耦合模式可以改善陆面过程模型对地表过程的模拟能力, 同时为大气过程提供更精确的下边界输入, 进而将高分辨率的区域气候模式与具有良好物理机制的陆面过程模型进行有效链接, 充分考虑地表过程变化对区域气候的反馈作用, 可以有效提高区域气候模式的模拟精度. Weather Research and Forecasting (WRF)是美国大气研究中心开发的中尺度区域气候模式, 集成了截至目前在中尺度气候模拟方面的最新研究成果(王澄海和孙超, 2013). WRF模式双向耦合了包括Noah(Chen等, 1996)在内的多个陆面过程模型(Jin和Wen, 2012), 可用于定量分析植被动态对区域气候和局地降水反馈效应的影响(Subin等, 2011; 熊建胜等, 2014; 王媛媛等, 2015; 杨扬等, 2015). WRF-Noah默认使用MODIS静态土地利用数据, 该数据集获取时间是2000年左右, 对于发生了大规模植被恢复的黄土高原, 仅能反映开展植被建设前黄土高原的土地利用类型, 故其时效性存在明显缺陷. European Space Agency Climate Change Initiative (ESA CCI)提供的动态土地利用数据时间范围为1992~2019年, 每年一期, 不断动态更新, 可真实反映大规模植被恢复后土地利用类型的改变(Ganguly等, 2010). 此外, 由于现行版本WRF-Noah耦合模式简化了生物地球化学过程, 其*LAI*、植被覆盖度和地表反照率等是根据土地利用类型结合参数对照表估算的, 一旦土地利用类型确定, 相应的植被和地表参数也就固定下来, 未考虑土地利用类型和植被覆盖年际间的真实动态变化过程, 导致该模式无法正确反映黄土高原大规模植被建设开始后各植被和地表参数的真实状况及其动态变化过程.

因此, 将陆面过程模型双向耦合到区域气候模式中, 结合遥感获取的不同时期动态土地利用数据、动态植被和地表参数, 构建考虑植被动态变化的陆气双向耦合模式, 探讨植被覆盖变化对区域气候和地表过程的影响, 对黄土高原植被恢复以及合理利用有限水资源等意义重大(罗立辉等, 2013; Hu等, 2015). 在区域气候与土地利用方式同时发生剧烈变化的黄土高原, 利用动态土地利用数据作为WRF-Noah耦合模式中土地利用资料的输入, 结合动态*LAI*、植被覆盖度和反照率, 对WRF-Noah耦合模式中植被和地表参数的处理方式改进, 使其能够有效反映开展植被建设后黄土高原真实的土地利用现状和植被覆盖动态变化, 进而可在考虑大规模植被恢复对流域水循环和陆

气交互作用强度影响的基础上, 准确描述大规模植被恢复的区域水分效应, 并定量评估黄土高原局地降水对植被恢复与重建的响应, 可为黄土高原生态保护和高质量发展提供科学支撑。

2 研究区概况

黄土高原地处黄河上中游地区(33°43′~41°16′N, 100°54′~114°33′E), 包括太行山以西、乌鞘岭以东、秦岭以北、长城以南广大地区。该区地处暖温带季风气候区的边缘, 大陆性和季风不稳定性更加突出, 年均降水量从西北向东南递增(150~820mm), 四季分明, 年平均温度为3.6~14.3℃, 平均海拔1000~1500m, 总面积约为64×10⁴km²。黄土高原长期以来缺乏植被保护, 生态环境脆弱, 土质疏松, 暴雨冲刷强烈, 致使该区水土流失严重。为改善黄土高原植被覆盖状况, 治理水土流失, 国家对该地区已经投入了大量的人力、物力和财力, 尤其是自1999年开始实施退耕还林(草)、封山育林(草)以及荒山造林(草)等大规模植被建设。黄土高原的植被类型从东南到西北依次为森林草原、典型草原、荒漠草原和荒漠, 植被覆盖状况与降水量变化一致, 从西北向东南逐渐好转。

3 数据来源与模型构建

本文所用陆气双向耦合模型为WRF-Noah(V3.6.1), 其中WRF是目前主流的中尺度天气预报模型, Noah是WRF中的陆面过程模块, 主要用于区域气候变化和陆气相互作用等研究(Emmanouil等, 2021; Gao等, 2020)。本研究中WRF-Noah模拟区域中心经纬度为37°N, 108°E, 投影方式为适于中纬度地区的兰勃特等角圆锥投影, 两条标准纬线分别为30°N和60°N。为WRF-Noah陆气耦合模型提供气象驱动的数据为欧洲中尺度天气预测中心(European Centre for Medium-

Range Weather Forecasts, ECMWF)发布的ERA-Interim再分析数据集(Hersbach和Dee, 2016)。模拟所采用的ERA-Interim时间分辨率为6h, 水平分辨率为0.5°×0.5°, 垂直分层为27层。此外, WRF-Noah模式水平分辨率采用10km。用于模拟结果验证的数据集为中国高时空分辨率地表气象数据集China Meteorological Forcing Dataset (CMFD)(Yang等, 2010; He等, 2020)。该数据集包含了2000~2015年降水和近地表气温等物理量, 时间和空间分辨率分别为3h和0.1°×0.1°, 其融合了中国范围内740个国家台站观测数据, 多项研究已经证明了CMFD数据集的精度和可靠性(Chen等, 2011; Yang等, 2017)。由于CMFD(0.1°)与WRF-Noah模型水平分辨率(10km)基本一致, 故在验证WRF-Noah模拟未进行二次插值。

本研究设计了两组模拟试验, 两组试验均采用相同的参数化方案组合和ERA-Interim再分析数据。第一组试验为控制试验(WRF CTL), 该试验假设没有开展植被恢复, 黄土高原地表覆盖保持植被建设前的状态, 试验采用默认的静态土地利用、静态植被和地表特征参数来驱动WRF-Noah模型, 模拟2000~2015年研究区的降水过程, 该试验代表未发生大规模植被建设的假设情景。第二组试验(WRF DYN)利用基于遥感数据制备的动态土地利用、动态植被和地表特征参数来驱动WRF-Noah模型, 模拟相同时段降水, 该试验代表发生大规模植被建设的真实情景。基于两组模拟试验结果, 综合分析黄土高原大规模植被建设对区域气候和局地降水反馈作用机理。

动态植被数据的制备是将2000~2015年间实际地表数据转换为WRF-Noah陆气耦合模式能够识别的格式, 其中植被和地表数据来源为基于遥感数据的Global Land Surface Satellite (GLASS)(Xiao等, 2016)数据集和ESA CCI土地覆被数据集(ESA, 2017), 主要包括土地利用类型、LAI、植被覆盖度和地表反照率等(详见表1)。对收集的遥感数据产品进行重分类和重采样,

表1 数据来源描述

数据来源	变量	时间长度(年份)	时间分辨率	空间分辨率
ERA-Interim再分析数据集	不同气压层的风场、比湿、温度等	1999~2015	6h	0.5°
ESA CCI土地覆盖数据集	土地利用	1999~2015	1年	0.3km
GLASS数据集	LAI、植被覆盖度、地表反照率	2000~2015	1天	1km
CMFD数据集	降水、气温	2000~2015	3h	0.1°

其中土地利用类型数据的插值选用最近邻域内插法, 其他数据的插值方法为双线性插值法, 最后制备得到的WRF-Noah模型能够识别的植被及陆面关键参数数据, 其中包含土地利用类型(*LU_INDEX*)、土地利用类型面积比(*LANDUSEF*)、陆地水体标识(*LAND-MASK*)、植被盖度(*GREENFRAC*)、叶面积指数(*LAI*)、地表反照率(*ALBEDO*)(括号内为WRF-Noah模型中变量名). 本文中所有变量的变化趋势定量评估均基于Theil-Sen Slope (Theil, 1950; Sen, 1968)趋势分析法, 包括*LAI*、植被覆盖度、反照率和降水量等变量.

4 研究结果

4.1 黄土高原植被覆盖状况时空变化分析

大规模植被恢复实施后, 黄土高原地表覆盖状况明显好转, 生态建设取得了良好成效, 其中林地面积增加了16.5%, 草地面积增加了7.6%, 裸地与荒漠面积减少了29.0%. 如图1所示, 黄土高原*LAI*呈显著上升的区域占全区总面积的53%, 其中以黄土高原东南部的高塬沟壑区和丘陵沟壑区的*LAI*增加趋势最为明显. 黄土高原年均*LAI*增加速率为 $1.22\% \text{ a}^{-1}$, 2000~2015年*LAI*累计增加了18.3%. 此外, 黄土高原植被覆盖度也呈现出显著的增加趋势, 植被覆盖度显著上升的区域占全区总面积的73%, 植被覆盖度也以研究区东南部的高塬沟壑区和丘陵沟壑区增加趋势最为显著. 黄土高原植被覆盖度年均值增加速率为 $2.71\% \text{ a}^{-1}$, 2000~2015年黄土高原植被覆盖度累计上升了40.7%(图1). 与此同时, 随着*LAI*和植被覆盖度的增加, 黄土高原地表反照率呈显著下降趋势, 平均下降速率为 $-0.50\% \text{ a}^{-1}$, 2000~2015年反照率累计下降了7.5%. 在空间上, 黄土高原地表反照率呈显著下降趋势的区域占全区总面积的49%(图1). 植被覆盖状况的好转和地表反照率的下降, 意味着更多的短波辐射会被地表吸收, 伴随着 CO_2 浓度增加导致的长波辐射增加(朴世龙等, 2019), 导致黄土高原地表净吸收辐射显著增加. 黄土高原地表净吸收辐射的上升, 意味着有更多的能量输入区域气候和水文系统, 对该区地表温度增加、气温升高、蒸散发增加和水汽垂直运动将有积极作用, 流域水循环速率和强度也将有所增加.

4.2 考虑植被动态变化的WRF-Noah降水过程模拟精度评估

准确合理的区域气候模拟是利用陆气耦合模型探究黄土高原植被建设对局地降水反馈作用的前提(Yu等, 2010; Bao等, 2015). 本研究拟通过系统的参数化方案敏感性试验, 为黄土高原区域气候模拟提供优化WRF模拟方案, 进而提高该区的降水模拟精度. 敏感性试验模拟时段选取为接近研究区降水多年气候平均态的2007年7月, 每次模拟时段为该年的6~7月, 其中6月为预热期(结果评估时舍去). 敏感性试验围绕与降水形成过程密切关联的三类参数化方案开展: 云微物理方案、大气边界层方案和积云对流方案, 总计包括WRF模型提供的11个云微物理方案、8个大气边界层方案和7个积云对流方案. 模型中其他物理方案保持不变, 具体为长波辐射方案Rapid Radiative Transfer Model(Mlawer等, 1997)、短波辐射方案Dudhia(Dudhia, 1993)和陆面过程参数化方案Noah(Chen等, 1996).

图2a为针对云微物理方案的敏感性试验分析结果, 由图可知, 各个试验的空间相关系数(PCC)都集中在0.65周围, 均方根误差(RMSE)在1.05~1.32区间变化, 其中CAM 5.1(Neale和Hoskins, 2010)方案表现最好(PCC最大为0.66, RMSE为1.14). 总体来讲, 云微物理方案的选择对研究区降水模拟影响不明显. 基于云微物理参数化方案敏感性试验, 进行大气边界层方案的敏感性试验, 结果如图2b所示. 研究区降水模拟对大气边界层方案更敏感, PCC分布区间为0.59~0.71, 其中MYNN 2.5(Nakanishi和Niino, 2006)方案具有较高的PCC(0.71), 综合考虑, 认为MYNN 2.5方案能够较好地反映研究区降水形成过程. 在前两组试验基础上, 最后进行了针对积云对流参数化方案的试验, 其中包含8种积云对流方案. 如图2c所示, 黄土高原降水模拟对积云对流参数化方案最为敏感, 各方案结果差异明显(PCC和RMSE变化区间分别为0.56~0.72和0.88~1.18), Kain-Fritsch(Kain, 2004)方案表现最好, 其具有较高的PCC(0.71), 且空间变异程度与CMFD观测较为接近. 因此, 基于三组敏感性试验, 本文比选出能较准确再现黄土高原降水的WRF最优参数化方案组合: RRTM长波辐射方案、Dudhia短波辐射方案、CAM5.1云微物理方案、MYNN2.5大气边界层方案、Kain-Fritsch积云对流方案和Noah陆面过程方案.

图 1 黄土高原2000~2015年间LAI、植被盖度(vegetation fraction)和反照率的时空变化趋势

其中(a)、(b)和(c)分别为空间变化图, 图中黑点表示变化趋势在统计上显著(95%置信水平), 色标单位为(10a)⁻¹; (d)、(e)和(f)分别为区域平均值时间变化趋势, 图中虚线为线性趋势, 星号代表统计上显著的变化趋势(95%)

图2 区域气候模型WRF参数化方案比选结果

依次为云微物理方案(a)、边界层方案(b)和积云对流方案(c)敏感性试验结果

虽然基于最优参数化方案的WRF能大幅度提高黄土高原降水模拟精度,但模拟结果还存在一定的误差(2007年7月观测降水总量为99mm,模拟值为87mm)。由于上述试验都采用WRF默认的地表静态数据,不能有效反映大规模植被恢复后,黄土高原剧烈的下垫面变化,这也是降水模拟存在误差的主要原因之一。因此,本研究进一步基于该优化方案组合,利用制备得到的2007年地表特征数据驱动模型,来探究植被动态变化对降水模拟的影响。如图2c所示,考虑实际下垫面变化后,WRF降水模拟能力得到进一步提升(PCC为0.74),七月降水总量模拟值为102mm。综上,考虑植被动态的陆气耦合模型WRF-Noah能够较准确地再现黄土高原的降水过程。

4.3 大规模植被恢复对局地降水的反馈效应定量评估

本研究将植被冠层参数动态变化(包括土地利用、植被盖度、 LAI 和反照率)与WRF模式相耦合,构建考虑植被动态变化的WRF-Noah陆气双向耦合模式。通过对比分析开展植被恢复的真实情景(WRF DYN)和未开展植被恢复的假设情景(WRF CTL)两组陆气双向耦合模拟试验,发现大规模植被恢复引起的蒸散发和水汽通量增加对局地降水量的增加具有积极作用(图3)。植被恢复与重建引起的 LAI 和植被覆盖度上升、反照率下降、净辐射增加、空气湿度上升和局地水汽通量增加等一系列连锁反应,通过陆气交互作用对局地降水产生的正反馈作用,是导致黄土高原降水量在2000~2015年间以 7.84 mm a^{-2} (基于CMFD的观测

降水数据)的速率增加的重要原因之一。如图3所示,基于植被动态变化的WRF-Noah陆气双向耦合模拟结果显示,开展大规模植被恢复的真实情景下黄土高原区域平均以 6.15 mm a^{-2} 的速率增加,其与观测降水相关系数为0.88, RMSE为 69 mm a^{-1} ,绝对误差为 -14 mm a^{-1} 。与之不同的是,基于植被不变的假设情景WRF-Noah陆气双向耦合模拟结果显示,假设黄土高原地表覆盖保持植被建设开展前的状态,黄土高原区域平均降水量仅以 3.85 mm a^{-2} 的速率上升,其与观测降水相关系数仅为0.84, RMSE为 101 mm a^{-1} ,绝对误差为 -70 mm a^{-1} 。上述研究结果表明,考虑植被动态的WRF-Noah对降水过程的模拟精度显著优于不考虑植被动态的WRF-Noah模拟精度。基于上述两组陆气双向耦合模拟试验结果的对比分析可知,大规模植被恢复通过影响陆气交互作用,导致的降水增加速率为 2.3 mm a^{-2} (基于 6.15 与 3.85 mm a^{-2} 之差),对黄土高原降水量上升速率(6.15 mm a^{-2})的贡献约为37.4%;而外部水汽环流变化导致的降水增加速率为 3.85 mm a^{-2} ,对研究区降水量增加速率(6.15 mm a^{-2})的贡献约占62.6%(图3)。

如图4所示,WRF DYN和WRF CTL两组模拟试验所得的黄土高原年降水量整体上都呈现出从东南向西北递减趋势。WRF DYN的区域降水量平均值为 443 mm a^{-1} ,而WRF CTL的区域降水量平均值为 388 mm a^{-1} ,WRF DYN比WRF CTL的区域降水量平均值高12.4%。两组模拟试验的年降水量模拟结果与黄土高原东南部的高塬沟壑区和丘陵沟壑区差距最大,在该区域WRF DYN的降水量普遍比WRF CTL高

图3 动态植被(WRF DYN)和植被不变(WRF CTL)两种情景下降水模拟结果与观测(OBS)的对比
(a)为降水年际变化, (b)为降水的年内变化

60mm a^{-1} 以上,个别区域可超过 100mm a^{-1} 。该结果与图1中黄土高原植被覆盖度、 LAI 和地表反照率变化趋势相一致,表明研究区局地降水过程对大规模植被恢复具有显著的正向响应,植被建设对黄土高原年降水量的增加具有积极作用。除年降水量的空间差异外, WRF DYN和WRF CTL两组模拟试验所得的黄土高原年降水量变化趋势也存在显著空间差异, WRF DYN比WRF CTL的降水量平均变化趋势高35%,且降水量变化趋势增加的区域也主要分布于黄土高原南部和东部的高塬沟壑区和丘陵沟壑区(图5)。

4.4 植被动态对区域气候的反馈效应机理解析

上述模拟结果表明黄土高原大规模植被建设能够在一定程度上增加局地降水。为进一步探究植被建设对区域降水的影响机理,本研究从流域下垫面水热状况变化、大气边界层发展和大气动力学角度出发,分析大规模植被建设下水汽、能量、动量输送和交换的变化规律,以求阐明植被动态对区域气候的反馈效应机理。如图6所示,通过综合对比分析动态植被和默认植被情景下各相关WRF-Noah输出物理量2000~2015年时段的气候平均态,可知动态植被情景下植被覆盖度和叶面积指数明显高于未发生植被建设情景(二者分别提升了+9.02%和+13.42%)。植被覆盖的增加一方面导致区域反照率降低(-5.11%),从而增加了接受的短波辐射,这可以理解为植被建设对地表的加热作用;另一方面,植被增加导致蒸散发(+17.18%)和潜热通量增加(+4.11 W m^{-2}),表现为对地表的冷却作用。然而,加热作用程度大于冷却作用,最终导致地表温度升高 0.45°C ,近地表(2m)气温升高 0.36°C 。植被建设还可以影响大气水分状况,蒸散发

的增加使得大气边界层水汽含量增加3.25%。此外,地表温度、近地表气温和感热通量的增加(3.79W m^{-2})也可导致大气边界层中对流不稳定的增加(对流有效位能增加+15.94%)和垂直运动的增强(+18.93%)。通过以上物理过程,大规模植被建设最终促进了区域降水过程的形成。

5 讨论

本研究在考虑植被动态对陆气交互作用强度影响的基础上,将植被冠层参数动态变化与WRF-Noah模式相耦合,构建考虑植被动态变化的WRF-Noah陆气双向耦合模式,通过对比分析开展植被恢复的真实情景(WRF DYN)和未开展植被恢复的假设情景(WRF CTL)两组陆气双向耦合模拟试验,发现考虑植被动态的影响,可大幅度提高WRF-Noah模式对区域降水的模拟精度。大规模植被恢复引起的蒸散发和水汽通量的上升及能量过程的改变对局地降水量的增加具有积极作用。

植被恢复是区域整体生态环境条件改善的基本标志,如何评价植被恢复的效果,研究植被恢复的合理性,未来应该在治理对策和策略方面如何调整,对水土流失治理和植被建设意义重大。对于地处干旱半干旱区的黄土高原而言,其地表水量小、地下水埋藏深难以利用,而雨水资源成为了该区植被恢复最主要的水分来源(Wang等, 2011)。大规模植被恢复通过对区域气候的反馈作用,促进了局地降水量的增加,而降水量的增加意味着雨水资源总量的提高,雨水资源时空特征则决定了植物的水分利用策略。因此,基于水资源消耗补给平衡关系,通过雨水资源高效利用,提

图 4 不同情景下WRF降水模拟的多年平均值(2000~2015年)空间分布对比图

(a)为动态植被情景, (b)为植被不变情景, (c)为两种情景模拟降水多年平均值的差值, 图中黑点表示两组试验模拟降水量差异在统计上显著(95%置信水平)

出合理的植被恢复策略成为了黄土高原生态建设管理和水资源高效利用的基础。

大规模植被恢复通过改变地表的物理特性, 从而形成独特的地表水量平衡和能量平衡过程; 植被恢复还可以提高蒸散发量, 增加向大气输送的水汽量, 可增加区域性大气湿度, 从而改变当地降水和水文格局。因此, 在评价植被恢复合理性, 提出适宜的植被恢复策略的过程中, 需考虑大规模植被恢复对流域水循环和陆气交互作用强度的影响。此外, 部分地区在实施植被建设过程中, 没有遵循水资源可持续利用原则, 盲目和过度的植被恢复大量消耗了水资源, 打破了原有

的雨水资源量和植被恢复耗水量的动态平衡关系, 出现了以土壤干燥化和植被退化为代表的新的生态问题(Wang等, 2010)。因此, 有必要利用WRF-Noah模式与植被动态过程相结合的方法, 在考虑植被恢复对局地降水的反馈效应基础上, 定量计算雨水资源化潜力, 大力研发和推广应用雨水资源高效利用技术体系, 揭示不同区域雨水资源所能承载的最适宜植被生物量, 提出基于水资源供需平衡的黄土高原植被恢复策略。

本研究主要探讨了植被恢复对黄土高原局地降水的反馈作用, 而局地降水改变同样会对植被生长产生重要影响。因此, 随着模型技术的不断发展, 未来有必

图5 不同情景下WRF降水模拟的变化趋势(2000~2015年)空间分布对比图
(a)为动态植被情景; (b)为植被不变情景; (c)为两种情景模拟降水变化趋势的差值

要将植被生长模型与区域气候模式进行双向耦合,对气候变化与植被动态间的互馈效应与相互作用开展进一步研究,以期为黄土高原生态建设的可持续发展进一步提供科学支撑。

6 结论

本研究通过构建考虑植被动态变化的陆气双向耦合模式,分析了2000~2015年间黄土高原土地利用类型、不同植被和地表参数的时空变化趋势,在考虑植被恢复对流域水热循环和陆气交互作用强度影响的基

础上,定量评估了植被恢复对该区局地降水的反馈效应,并阐明了其作用过程的物理机制。大规模植被恢复实施以来,黄土高原植被覆盖度和 LAI 分别累计上升了40.7%和18.3%,地表反照率下降了7.5%,植被覆盖状况得到了明显改善,其中以黄土高原东南部的高塬沟壑区和丘陵沟壑区的植被恢复效果最为显著,大规模植被重建与恢复工程取得了显著成效。植被恢复通过改变土地利用类型、地表反照率、植被叶面积指数和植被覆盖度等下垫面性质,引起净辐射、蒸散发、土壤水分、地表径流、大气边界层水汽含量、地表温度、感热和潜热通量等一系列过程的变化,造成

图6 植被恢复对黄土高原局地降水反馈效应的作用机理示意图

图中蓝线和加号“+”表示增加, 图中红线和减号“-”表示减少, 所有的值都是动态植被情景下与默认植被情景下WRF变量2000~2015年时间段气候平均态的差值, 百分数是差值对比于默认植被情景下的WRF变量值

陆面与大气间的交互作用强度发生改变, 对区域气候和局地降水过程产生反馈效应, 打破了原有的地表水量平衡关系。通过设立考虑植被恢复的真实情景和不考虑植被恢复的假设情景两组模拟试验, 对比分析了植被建设对局地降水过程的净影响, 发现大规模植被恢复对黄土高原局地降水量的增加具有积极效应。植被覆盖增加一方面导致区域反照率降低, 从而导致接受的短波辐射增加, 对地表产生加热作用; 另一方面, 植被增加导致蒸散发和潜热通量增加, 对地表产生冷却作用; 而加热作用程度大于冷却作用, 最终导致了地表温度的升高。植被建设还可以影响大气水分状况, 蒸散发的增加使得大气边界层水汽含量增加3.25%。同时地表温度和感热通量的增加都促进了大气边界层中对流不稳定的增加和垂直运动的增强。通过以上物

理过程, 大规模植被建设最终促进了局地降水的形成。观测数据显示2000~2015年黄土高原降水量以 7.84mm a^{-2} 的速率显著增加, 模拟结果显示大规模植被恢复对研究区降水量增加速率的贡献约为37.4%, 而外部水汽环流变化对研究区降水量增加速率的贡献约占62.6%。考虑植被恢复情景比不考虑植被恢复情景下的黄土高原年均降水量高12.4%。降水量的增加意味着可利用雨水资源总量的增加, 通过研发和应用雨水资源高效利用技术, 可缓解因干旱缺水和植被恢复而加剧的水资源供需矛盾。

参考文献

- 胡春宏, 陈绪坚, 陈建国. 2008. 黄河水沙空间分布及其变化过程研究. 水利学报, 39: 518-527
- 贾仰文, 王浩, 仇亚琴, 周祖昊. 2006. 基于流域水循环模型的广义水资源评价(II)—黄河流域应用. 水利学报, 37: 1181-1187
- 刘纪远, 邵全琴, 延晓冬, 樊江文, 邓祥征, 战金艳, 高学杰, 黄麟, 徐新良, 胡云峰, 王军邦, 匡文慧. 2011. 土地利用变化对全球气候影响的研究进展与方法初探. 地球科学进展, 26: 1015-1022
- 罗立辉, 张耀南, 周剑, 潘小多, 孙维君. 2013. 基于WRF驱动的CLM模型对青藏高原地区陆面过程模拟研究. 冰川冻土, 35: 553-564
- 朴世龙, 张新平, 陈安平, 刘强, 连旭, 王旭辉, 彭书时, 吴秀臣. 2019. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响. 中国科学: 地球科学, 49: 1321-1334
- 任宏昌, 史学丽, 张祖强. 2014. 2003~2009年中国地区叶面积指数变化特征分析. 气象科学, 34: 171-178
- 汤秋鸿. 2020. 全球变化水文学: 陆地水循环与全球变化. 中国科学: 地球科学, 50: 436-438
- 王澄海, 孙超. 2013. 一个基于WRF+CLM区域气候模式(WRFC)的建立及初步试验. 高原气象, 32: 1626-1637
- 王飞, 王宗敏, 杨海波, 赵勇. 2018. 基于SPEI的黄河流域干旱时空格局研究. 中国科学: 地球科学, 48: 1169-1183
- 王光谦, 张长春, 刘家宏, 魏加华, 薛海, 李铁键. 2006. 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, 2: 10-16
- 王媛媛, 谢正辉, 贾炳浩, 于燕. 2015. 基于陆面过程模式CLM4的中国区域植被总初级生产力模拟与评估. 气候与环境研究, 20: 97-110
- 肖志强, 王锦地, 王森. 2008. 中国区域MODIS LAI产品及其改进. 遥感学报, 12: 993-1000
- 熊建胜, 张宇, 王少影, 尚伦宇, 陈云刚, 沈晓燕. 2014. CLM4.0土壤水分传输方案改进在青藏高原陆面过程模拟中的效应. 高原气象, 33: 323-336
- 杨大文, 张树磊, 徐翔宇. 2015. 基于水热耦合平衡方程的黄河流域

- 径流变化归因分析. 中国科学: 技术科学, 45: 1024–1034
- 杨磊, 张涵丹, 陈利顶. 2018. 黄土宽梁缓坡丘陵区次降雨对土壤水分补给效率与阈值研究. 中国科学: 地球科学, 48: 457–466
- 杨扬, 左洪超, 杨启东, 杜冰, 王晓霞, 王明星, 武建军. 2015. CLM4.0 模式对干旱区荒漠草原过渡带快速变化陆面过程的数值模拟研究. 高原气象, 34: 923–934
- 张宝庆, 吴普特, 赵西宁. 2011. 近30 a黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析. 农业工程学报, 27: 287–293
- Bao J, Feng J, Wang Y. 2015. Dynamical downscaling simulation and future projection of precipitation over China. *J Geophys Res Atmos*, 120: 8227–8243
- Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, Shi W Y, Song Y, He X H. 2015. Balancing green and grain trade. *Nat Geosci*, 8: 739–741
- Chen Y, Yang K, He J, Qin J, Shi J, Du J, He Q. 2011. Improving land surface temperature modeling for dry land of China. *J Geophys Res*, 116: D20104
- Chen F, Mitchell K, Schaake J, Xue Y, Pan H L, Koren V, Duan Q Y, Ek M, Betts A. 1996. Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. *J Geophys Res*, 101: 7251–7268
- Dudhia J. 1993. A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon Wea Rev*, 121: 1493–1513
- Emmanouil G, Vlachogiannis D, Sfetsos A. 2021. Exploring the ability of the WRF-ARW atmospheric model to simulate different meteorological conditions in Greece. *Atmos Res*, 247: 105226
- ESA. 2017. Land Cover CCI Product User Guide Version 2. Technical Report
- Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. 2016. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nat Clim Change*, 6: 1019–1022
- Ganguly S, Friedl M A, Tan B, Zhang X Y, Verma M. 2010. Land surface phenology from MODIS: Characterization of the collection 5 global land cover dynamics product. *Remote Sens Environ*, 114: 1805–1816
- Gao Y, Chen F, Miguez-Macho G, Li X. 2020. Understanding precipitation recycling over the Tibetan Plateau using tracer analysis with WRF. *Clim Dyn*, 55: 2921–2937
- Gibbard S, Caldeira K, Bala G, Phillips T J, Wickett M. 2005. Climate effects of global land cover change. *Geophys Res Lett*, 32: L23705
- He J, Yang K, Tang W, Lu H, Qin J, Chen Y, Li X. 2020. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China. *Sci Data*, 7: 1–11
- Hersbach H, Dee D. 2016. ERA5 reanalysis is in production. ECMWF Newslett, 147: 5–6
- Hirsch A L, Pitman A J, Kala J. 2014. The role of land cover change in modulating the soil moisture-temperature land-atmosphere coupling strength over Australia. *Geophys Res Lett*, 41: 5883–5890
- Hu Y, Zhang X Z, Mao R, Gong D Y, Liu H B, Yang J. 2015. Modeled responses of summer climate to realistic land use/cover changes from the 1980s to the 2000s over eastern China. *J Geophys Res Atmos*, 120: 167–179
- Jin J, Wen L. 2012. Evaluation of snowmelt simulation in the weather research and forecasting model. *J Geophys Res*, 117: D10110
- Kain J S. 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J Appl Meteor*, 43: 170–181
- Liang W, Bai D, Wang F Y, Fu B J, Yan J P, Wang S, Yang Y T, Long D, Feng M Q. 2015. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau. *Water Resour Res*, 51: 6500–6519
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, Iacono M J, Clough S A. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J Geophys Res*, 102: 16663–16682
- Nakanishi M, Niino H. 2006. An improved Mellor-Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. *Bound-Layer Meteorol*, 119: 397–407
- Neale R, Hoskins B. 2010. Description of the NCAR community atmosphere model (CAM 5.0). NCAR Technical Note. Boulder: National Center for Atmospheric Research (NCAR)
- Sen P K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *J Am Statist Associat*, 63: 1379–1389
- Su C H, Fu B J. 2013. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes. *glob Planet Change*, 101: 119–128
- Subin Z M, Riley W J, Jin J M, Christianson D S, Torn M S, Kueppers L M. 2011. Ecosystem feedbacks to climate change in California: Development, testing, and analysis using a coupled regional atmosphere and land surface model (WRF3-CLM3.5). *Earth Interactions*, 15: 1–38
- Theil H. 1950. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. I, II, III. *Proc Roy Netherlands Acad Sci*, 53: 386–392, 521–525, 1397–1412
- Wang Y Q, Shao M A, Shao H B. 2010. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China. *J Hydrol*, 381: 9–17
- Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, Liu Z P. 2011. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China. *Agric For Meteorol*, 151: 437–448
- Wang S, Fu B J, Piao S L, Lü Y H, Ciais P, Feng X M, Wang Y F. 2016.

- Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nat Geosci*, 9: 38–41
- Wen X H, Lu S H, Jin J M. 2012. Integrating remote sensing data with WRF for improved simulations of Casis effects on local weather processes over an RRID region in northwestern China. *J Hydro-meteorol*, 13: 573–587
- Wu L Y, Zhang J Y. 2013. Role of land-atmosphere coupling in summer droughts and floods over eastern China for the 1998 and 1999 cases. *Chin Sci Bull*, 58: 3978–3985
- Xiao Z Q, Liang S L, Wang J D, Yang X, Zhao X, Song J L. 2016. Long-Time-Series global land surface satellite leaf area index product derived from MODIS and AVHRR surface reflectance. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 54: 5301–5318
- Yang F, Lu H, Yang K, He J, Wang W, Wright J S, Li C, Han M, Li Y. 2017. Evaluation of multiple forcing data sets for precipitation and shortwave radiation over major land areas of China. *Hydrol Earth Syst Sci*, 21: 5805–5821
- Yang K, He J, Tang W, Qin J, Cheng C C K. 2010. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: Observation and modeling in the Tibetan Plateau. *Agric For Meteorol*, 150: 38–46
- Yu E T, Wang H J, Sun J Q. 2010. A quick report on a dynamical downscaling simulation over China using the nested model. *Atmos Ocean Sci Lett*, 3: 325–329
- Zhang B Q, He C S, Burnham M, Zhang L H. 2016. Evaluating the coupling effects of climate aridity and vegetation restoration on soil erosion over the Loess Plateau in China. *Sci Total Environ*, 539: 436–449

(责任编辑: 陈建徽)