

退耕还林还草工程加剧黄土高原退耕区蒸散发

王雅舒^{1,2}, 李小雁^{1,2*}, 石芳忠^{1,2}, 张树磊^{1,2}, 吴秀臣^{1,2}

1. 北京师范大学, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学地理科学学部自然资源学院, 北京 100875

* 联系人, E-mail: xyli@bnu.edu.cn

2018-09-03 收稿, 2018-11-03 修回, 2018-11-06 接受, 2019-01-21 网络版发表

国家自然科学基金(41390462)和地表过程与资源生态国家重点实验室项目(2017-ZY-06)资助

摘要 黄土高原退耕还林(草)工程显著影响着区域植被生长及水文循环过程, 对陆地蒸散发(ET)年际变化有着很大影响. 本文基于全球通量估算和模型模拟蒸散发产品、格点气候数据及遥感植被特征参量数据, 利用趋势分析、逐步回归分析及广义线性模型等方法, 研究了退耕还林(草)工程实施前后黄土高原退耕区ET的时空变化特征. 研究表明: (1) 与退耕前相比较, 退耕区在退耕还林(草)后ET的升高趋势明显, 但其变率存在较大的空间差异, 其中, 以年降水量在400~600 mm区域内变化趋势最大; (2) 相较于生长季平均温度和生长季总降水量, 退耕区土壤含水量及植被NDVI是ET变化的主要影响因子; (3) 退耕后ET变化趋势增大更多地归因于退耕区植被生长的加速, 并且退耕后土壤含水量对ET贡献较退耕前降低, 而NDVI的贡献度增加. 本研究针对黄土高原退耕区在退耕还林(草)工程前后ET的变化趋势进行的探究, 为工程实施对该区域水文过程的影响评估提供了科学依据.

关键词 黄土高原, 退耕还林(草)工程, 退耕区, 蒸散发

陆地蒸散发(evapotranspiration, ET)是陆地水文循环和能量循环过程中最为关键和复杂的环节之一, 它由土壤蒸发与植物蒸腾组成^[1]. 在全球尺度上, 陆地约60%以上的降水以ET的形式返回到大气系统^[2]; 在干旱半干旱地区, 通过ET消耗的水分甚至达到80%以上^[3,4]. 因此, 在干旱半干旱地区, ET在水文循环中占有主导地位^[5]. 然而, 气候和植被变化分别如何影响蒸散发过程还不十分清楚, 尤其在地形复杂和广泛开展人工植被建设的黄土高原地区. 因此, 分析ET的时空变化规律, 定量辨识ET变化的影响因素, 对于理解和预测该区域水文循环过程起着至关重要的作用.

黄土高原位于我国黄河中游, 总体植被覆盖率低, 生态条件脆弱. 由于其特殊的地理、气候和土壤条件, 加之长期的过度耕种, 该地区沟壑纵横, 成为

我国水土流失和土地退化程度最为严重的区域之一^[6]. 自1999年起, 国家开始提出并实施退耕还林(草)、荒山造林等一系列大规模生态修复工程^[7,8], 黄土高原地区成为政府首批的“退耕还林还草”工程(Grain for Green Project, GFGP)试点区域之一. 据统计, 退耕还林(草)工程实施以来, 黄土高原植被覆盖度增加明显^[9], 累计造林面积达到 $1.89 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[10], 成效显著. 植被的生长可通过改变地表粗糙度、改变地表反射率、对降水的拦截以及蒸腾等过程影响区域ET^[11], 从而对生态水文过程产生重要影响. 研究表明, 随着黄土高原植被的恢复, 2015年黄土高原地区ET显著增加, 而河道径流量和泥沙量明显减少, 其中径流减少约26%, 泥沙量减少约21%^[12]. Feng等人^[13]通过对退耕还林(草)后黄土高原地区ET、产流量、径流量、土壤含水量、社会用水量以及地下水等

引用格式: 王雅舒, 李小雁, 石芳忠, 等. 退耕还林还草工程加剧黄土高原退耕区蒸散发. 科学通报, 2019, 64: 588–599

Wang Y S, Li X Y, Shi F Z, et al. The Grain for Green Project intensifies evapotranspiration in the revegetation area of the Loess Plateau in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 588–599, doi: 10.1360/N972018-00515

水文要素分析指出,黄土高原能够承载的植被量可能已接近临界值。

黄土高原属于水资源严重短缺的地区,充分认识其ET的时空变化特征及影响因素将对该区域水资源的合理配置发挥作用,同时对于该地区农业灌溉、生态需水等方面具有一定实际意义。伴随着黄土高原植被盖度的增加,植被生长对区域ET的影响引起广泛关注,已有的研究主要集中在黄土高原典型区域退耕前后植被生长和水文循环各要素的变化^[1,6,8,10]。但这些研究多针对于小流域或站点尺度,缺乏以整个黄土高原退耕还林(草)区为研究区,从多年尺度上系统研究退耕还林(草)对ET的影响及其空间分异特征。因此,开展黄土高原全区退耕还林(草)实施前后植被及环境因子对该区域ET的影响研究,尤其是退耕前后两个时段ET的影响对比研究十分重要。同时,气候变化和退耕还林(草)对ET贡献的定量辨识还不清楚,需从多年尺度上研究退耕前后两个时段退耕区ET对于气候和植被变化的响应特征。

本研究以黄土高原退耕还林(草)区为研究对象,利用遥感蒸散发GLEAM(global land-surface evaporation: The Amsterdam methodology)产品(GET),结合归一化植被指数(Normal Difference Vegetation Index, NDVI)以及土壤水分和气象数据,在长时间序列上对比分析黄土高原退耕区退耕前后20年ET变化速率

的时空格局,并揭示其变化的潜在机制。具体研究目标:(1)剖析黄土高原退耕区退耕前后ET变化趋势的时空差异;(2)辨识退耕区退耕后影响ET变化的主导因子及其机理过程。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原地区位于黄河流域中部(33°43′~41°16′N, 100°54′~114°33′E),横跨山西、宁夏、陕西、甘肃、内蒙古、青海和河南7个省区,总面积约 $6.49 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。其气候类型属于典型的大陆性季风气候,冬季寒冷,夏季温暖湿润。年均气温3.6~14.3℃,年降水量为150~800 mm,且主要集中在6~9月,占全年降水量的55%~78%。主要土地利用类型为林地、草地、灌丛、农田、荒漠等。自1999年起,我国开始实施退耕还林(草)工程(GFGP),本研究选取的主要研究区域为黄土高原退耕还林(草)区(图1)。退耕还林(草)区域的鉴别依据Zhai等人^[14]所绘制的黄土高原覆被变化分布图,Liu等人^[15,16]利用黄土高原2000~2010年空间分辨率为30 m的土地利用和土地覆盖变化数据,将25种土地利用类型和土地覆盖类别的分级分类系统分为由农田、森林、草地、水体、未利用地和建成区组成的6个集合类,确定并比较了黄土高

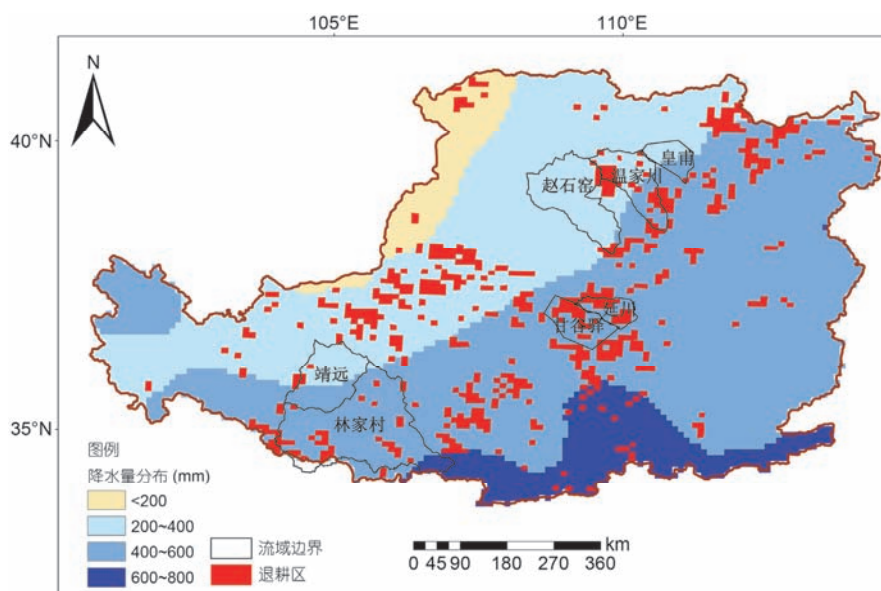


图1 黄土高原退耕区域分布图

Figure 1 Sketch map of the revegetation area in the Loess Plateau in China

原地区2000~2010年耕地、森林和草地之间的土地利用变化,最终得到黄土高原覆被变化的分布图.本研究选取其中耕地转变为林草的部分,进行退耕区的提取.如图1所示,退耕区分布于黄土高原各个区域,主要集中在黄土高原中部及南部地区.另外,通过查阅黄土高原水文资料,本研究选取了黄土高原范围内主要的7个小流域,具体分布位置如图1所示.流域名称分别为温家川、延川、皇甫、甘谷驿、靖远、林家村、赵石窑,利用数字高程(DEM)数据提取7个闭合小流域边界.

1.2 数据来源

1.2.1 蒸散发数据

本研究选择3套ET数据集进行对比验证,包括全球通量产品蒸散发(FLUXNET ET, FET)、模型模拟WB-MTE-ET(WET)及GLEAM ET(GET). FET是Jung等人^[2]基于模型树整合算法,根据全球的通量数据在空间及时间上反演所得的一套全球ET数据.同时,Jung等人^[2]通过能量的平衡闭合假设了一个固定的波文比,以此对FET数据进行了额外修正.该数据集空间分辨率为 0.5° ,时间分辨率为月,时间尺度1982~2011年(<https://fluxnet.fluxdata.org/>).近几年国内外众多学者利用FET数据在黄土高原及全球进行了研究,该数据集应用较普遍^[2,17~21]. WET数据集是Zeng等人^[22]基于水量平衡(water balance, WB)方法与模型树整合(the model tree ensemble, MTE)算法来模拟的一套1982~2009年空间分辨率为 0.5° 的月尺度全球ET数据.该数据集将每月基于水量平衡所得的流域ET与潜在驱动因素(如辐射、温度、降水、风速、植被指数等)耦合所得.对于该数据的详细介绍及下载可参见文献[22]. GET产品是由英国的布里斯托大学地理科学学院研发并提供的(<https://www.gleam.eu/>). GET算法基于Priestley-Taylor公式所得,利用来自不同卫星的遥感观测数据反演得到,该算法计算了蒸散发(ET)的所有组分,包括蒸散发、土壤蒸发(E_s)、植被蒸腾(T)等^[23],空间分辨率为 0.25° ,是时长为1980~2016年的日尺度实际蒸散发. Miralles等人^[24]已将GLEAM产品在全球范围内进行了验证,结果表明,GLEAM模型反演的蒸散发产品能较好地刻画不同生态系统的ET.同时,为了进一步验证3套ET的区域适应性,本研究选择了黄土高原区域内7个闭合小流域对ET数据进行了验证(图1).

本研究先分别将GET的蒸散发、土壤蒸发(E_s)和植被蒸腾(T)进行累加计算到月尺度,然后将FET和WET的空间分辨率重采样到 0.25° ,最后利用研究区域栅格图对3套数据产品进行截取得到黄土高原退耕区ET.研究中3套数据所采用研究时段分别为1982~2011年,1982~2009年及1982~2015年.

1.2.2 植被NDVI数据

归一化植被指数(NDVI)是目前最为常用的表征植被状况的指标,可以对植被生长动态变化进行监测,同时能够在较大时空尺度上客观反映植被信息^[25].本研究利用GIMMS(Global Inventory Modeling and Mapping Studies)发布的最新全球尺度NDVI数据集GIMMS NDVI3g(GNDVI)来表征植被生长状况(<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g.v1/>). GNDVI数据集时间序列长、覆盖范围广、植被动态变化表征能力强.该数据集的空间分辨率为 0.083° ,时间分辨率15 d,时间跨度为1982~2015年.本研究先将数据进行累加计算到月尺度,然后对其空间分辨率进行重采样到 0.25° .

1.2.3 气候及径流数据

格点气候数据采用的是中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集,该数据集由中国科学院青藏高原研究所开发(<http://westdc.westgis.ac.cn/>).它是以国际上现有的Princeton再分析资料、GLDAS资料、GEWEX-SRB辐射资料,以及TRMM降水资料为背景场,融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成^[26].该数据集共包括7个变量,研究主要选用其月尺度温度和降水数据.数据集的空间分辨率为 0.1° ,时间长度选用1982~2015年.本研究对其空间分辨率进行重采样到 0.25° .径流数据来自国家水文年鉴整编的1982~2010年逐年径流量资料.

1.2.4 土壤水分数据

土壤水分(SWC)数据源于欧洲中心(ECMWF)的ERA-Interim再分析资料. ERA-Interim是ECMWF继ERA40之后推出的一套新的再分析资料^[27](<http://apps.ecmwf.int/datasets/>),在时间段上有部分和ERA40重叠(1989~2002年),但在资料的处理上有较大进步:由三维同化系统(3DVAR)变成四维同化系统(4DVAR);更改了模型参数;增加了资料精度,水平分辨率加强;并应用了更多的卫星和地面观测资料等. ERA-Interim提供两套数据:一个是同化分析数据,一个是预报数据.近几年不少学者在黄土高原

使用ERA-Interim数据进行了相关研究,被广泛应用^[28~30].本研究选用其1982~2015年,空间分辨率为0.25°的月尺度数据.ERA-Interim有4个土壤湿度层,深度分别为:7, 28, 100, 255 cm, 本文选用其第3层土壤水分,即深度为1 m.

1.3 研究方法

1.3.1 遥感蒸散发产品的验证

在研究区内选取7个小流域(流域分布如图1所示),流域边界使用数字高程(DEM)数据进行提取(<http://www.gscloud.cn/>),并得到1982~2010年7个小流域的年径流及降水数据.通过流域多年平均水量平衡方程(流域多年平均土壤水分变化为0),分别计算7个流域多年平均 E_T .流域多年平均水量平衡方程为

$$E_T = P - Q, \quad (1)$$

其中, P 为研究时段的总降水量(mm a^{-1}); Q 为流域出口断面处的总径流量(mm a^{-1}).

同时,本研究计算出3套遥感蒸散发数据(FET, GET和WET)相应的多年尺度流域面平均值,在空间尺度上,将基于水量平衡的流域实际蒸散发(SET)与3套遥感蒸散发数据(FET, GET和WET)分别进行对比;在时间尺度上,进一步计算流域多年平均蒸散发量的变化率,比较基于水量平衡的流域实际蒸散发变化(ΔSET)与基于遥感的流域实际蒸散发变化(ΔFET , ΔGET 和 ΔWET).

1.3.2 统计方法

基于黄土高原退耕还林(草)工程的实施情况,本研究以1999年为界对研究时段进行了划分:将1982~1997年划归为退耕还林(草)前,2001~2015年划归为退耕还林(草)后.本研究利用一元线性回归的方法对研究区退耕前后的生长季NDVI, ET等变化趋势进行分析,并选取线性拟合斜率作为变化趋势的指标.同时选择5~9月作为植被生长季时段,所有分析均是对研究区植被生长季期间的均值进行分析探究.

在对退耕前后研究区的影响因子探究中,利用逐步线性回归的方法对ET的主要影响因子进行筛选.逐步回归是线性回归模型自变量选择的一种方法,可利用该方法筛选并剔除引起多重共线性的变量^[31].本研究用逐步回归筛选影响ET变化的主要环境因子.

为分析NDVI及土壤水分(SWC)对ET的贡献,采用广义线性模型(General Linear Model, GLM)的方法

进行贡献度计算.广义线性模型(GLM)属于一般线性模型的直接推广,是处理离散型观测数据的一类有效统计模型,同时也是一种将各自变量对因变量相对贡献分离的有效方法^[32].本研究将GLM用于主要环境因子对ET变化的贡献度分析.所有变量在进行GLM分析前先完成去线性趋势分析,降低由于数值高低引起的结果差异.研究中的GLM处理运用R语言完成,去趋势分析运用Matlab2016b软件完成.

2 结果与分析

2.1 数据验证

本研究将3套ET产品同7个小流域(温家川、延川、皇甫、甘谷驿、靖远、林家村、赵石窑)基于水量平衡的流域多年平均实际蒸散发进行检验,结果如图2所示.在空间尺度上,基于水量平衡的流域实际蒸散发(SET)与3套遥感蒸散发数据(FET, GET和WET)的对比如图2(a)所示.通过对比发现(图2(a)),3套ET数据大部分分布在1:1线下方.这表明3套ET数据相比流域计算值普遍偏低;其中,FLUXNET ET(FET)和GLEAM ET(GET)同观测数据的相关系数分别达到0.89($P < 0.01$)和0.97($P < 0.01$),而WB-MTE-ET(WET)与观测数据的相关系数为0.86($P < 0.01$).因而在趋势上,相比另外两套数据GET同流域计算ET一致性更好.

在时间尺度上,本研究进一步计算了流域多年平均蒸散发量的变化,然后将基于水量平衡的流域实际蒸散发变化(ΔSET)与基于遥感的流域实际蒸散发变化(ΔFET , ΔGET 和 ΔWET)进行比较,结果如图2(b)所示.对比发现,同其他两套产品相比,GET在年尺度上与流域计算数据的相似程度最高,整体趋势最为接近,相关系数达到0.94($P < 0.01$).考虑到本研究主要关注ET变化量及其趋势,GET数值的偏小对结果影响较小,其具有较好的区域适用性,因此本研究最终选择GLEAM ET(GET)产品进行探究.

2.2 退耕区生长季NDVI及ET变化的空间分布

本研究探究了退耕区退耕前后生长季NDVI及ET的时空变化特征.结果表明,退耕前(1982~1998年)黄土高原退耕区生长季NDVI呈现较为缓慢的增长,增速0.01/10 a ($P < 0.1$);从1999年大规模的退耕开始,研究区生长季NDVI开始迅速增长,增速达到0.07/10 a ($P < 0.01$).整体来看(图3(a)),退耕后研究区

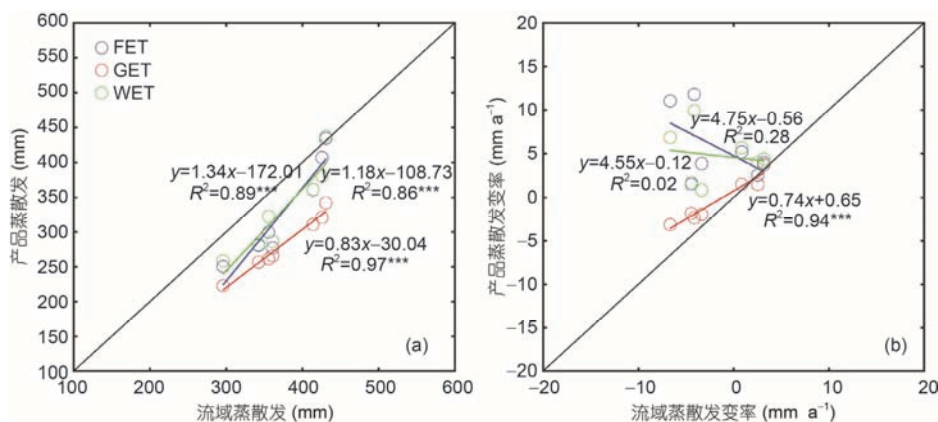


图2 各蒸散发产品同流域计算蒸散发的时空对比。(a) 7个流域多年平均蒸散发各产品数据与计算流域蒸散发对比;(b) 7个流域各产品蒸散发同计算流域蒸散发年际变化趋势对比。其中***表示 $P<0.01$

Figure 2 Time and space comparison between three evapotranspiration products and secular annual mean basin actual evapotranspiration. (a) Comparison of multi-year average evapotranspiration data and calculation of evapotranspiration in seven catchments. (b) Comparison of inter-annual variation trends between three evapotranspiration products and calculation of evapotranspiration in seven catchments. *** indicates statistical significance at $P<0.01$

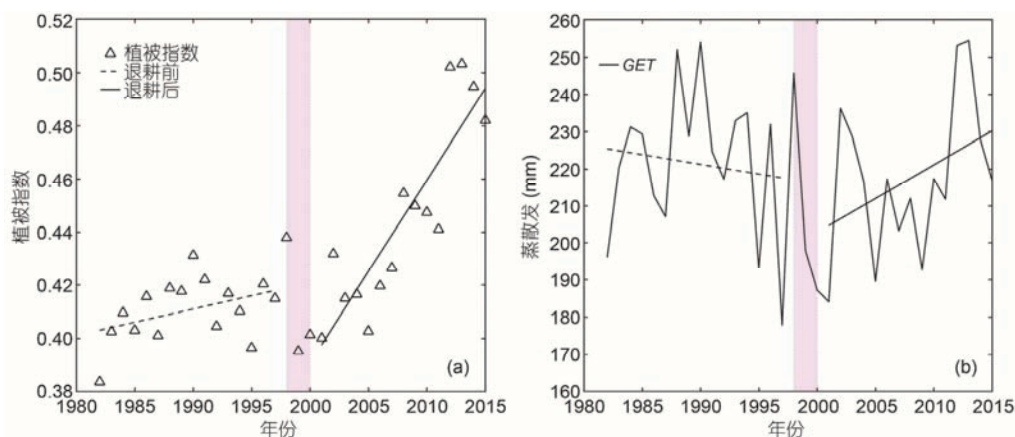


图3 黄土高原退耕区NDVI(a)与ET(b)的年际变化趋势

Figure 3 Trends of inter-annual variabilities of NDVI (a) and ET (b) in the revegetation area of the Loess Plateau

NDVI 呈快速增长趋势,表明退耕还林还草政策使得黄土高原退耕区的生态环境逐年改善,植被状况总体呈好转的趋势。如图3(b)所示,退耕前(1982~1998年)退耕区ET同样波动较为明显,变化趋势不显著,变率为 -0.52 mm/a;退耕后,ET则呈现出显著增长趋势,增速达到 1.82 mm/a。总体而言,1999年后黄土高原退耕区NDVI显著增加,且ET的增长趋势与植被整体的变化相吻合。

基于退耕前后NDVI及ET数据,分别计算得到了2个时间段退耕区生长季平均NDVI及ET空间分布图(图4)。如图4(a)所示,在大规模植被建设开始前,研究区的植被覆盖以小幅波动为主,个别地区有所好

转,但大部分区域均无显著变化。退耕后,研究区NDVI生长季均值增加显著,变化值 Δ NDVI达到 0.03 (表1)。呈显著上升的区域主要位于黄土高原中部的榆林、延安等退耕还林(草)工程重点建设的地区(图4(c))。不同降水梯度NDVI的增速均较退耕前增大(图4(e),表1),表明研究区的植被得到恢复。基于GET的生长季ET在退耕前(1982~1998年)随降水梯度的变化ET变化速率区分不明显(图4(b)),虽整体变率均较大,但ET变化速率随降水梯度的增加呈现出负增长趋势,且降雨量在 400 mm及以上的地区负增长速率更显著(图4(f));相反退耕后ET较退耕前变率有所变小(图4(d)),但整个研究区的ET明显呈现正增长

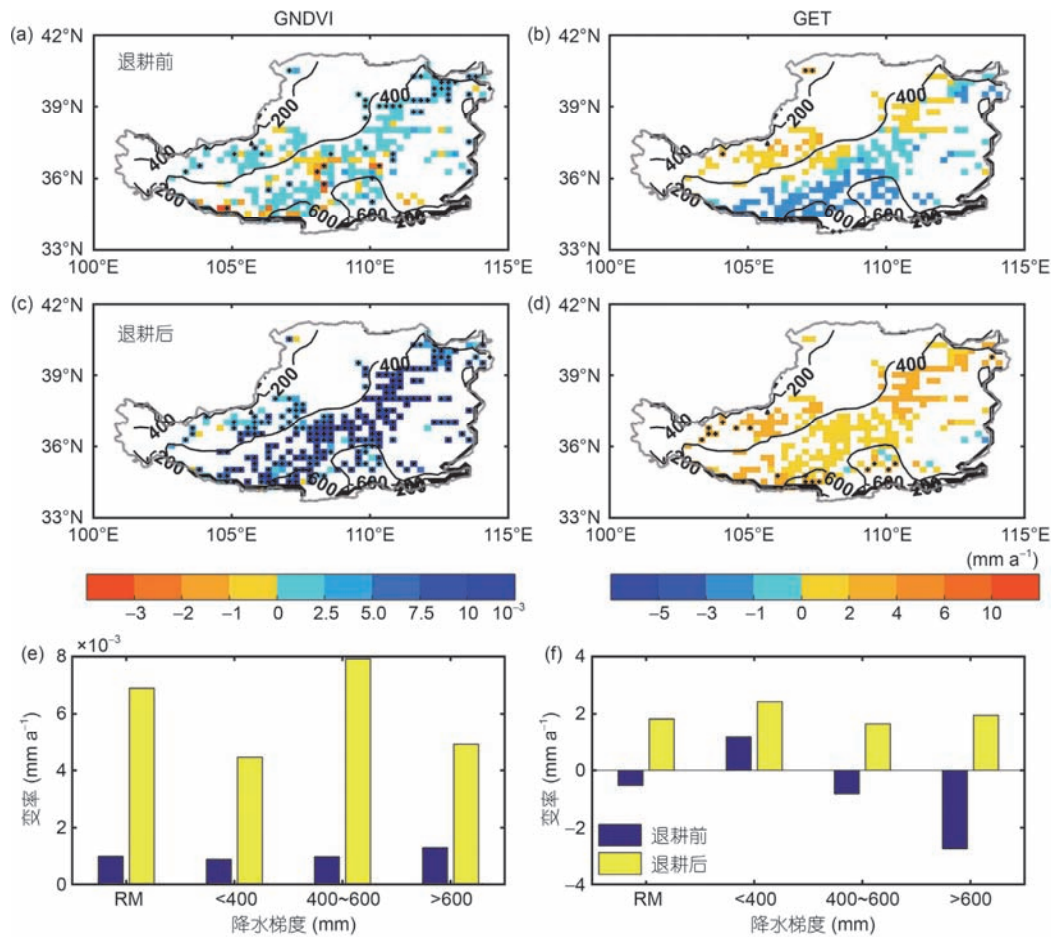


图 4 黄土高原退耕区NDVI与ET的空间分布. 退耕前NDVI(a)及ET(b)的空间分布; 退耕后NDVI(c)及ET(d)的空间分布; 退耕前后不同降水梯度NDVI(e)及ET(f)变化速率对比. $N_{RM}=254$, $N_4=54$, $N_6=179$, $N_8=21$. 其中, N_{RM} 表示全区域内栅格数量; N_4 , N_6 和 N_8 分别表示降水量小于 400 mm、降水量在 400~600 mm之间及降水量大于 600 mm区域的栅格数量. 图中黑色点表示显著性通过 95%检验的区域

Figure 4 Spatial variabilities of NDVI and ET in the revegetation area of the Loess Plateau. Spatial variabilities of NDVI (a) and ET (b) before the GFGP; spatial variabilities of NDVI (c) and ET (d) after the GFGP; variabilities of NDVI (e) and ET (f) of different precipitation gradients before and after the GFGP. $N_{RM}=254$, $N_4=54$, $N_6=179$, $N_8=21$. N_{RM} indicates the number of grids in the entire area; N_4 , N_6 and N_8 represent the number of grids with precipitation less than 400 mm, precipitation between 400 and 600 mm and precipitation greater than 600 mm, respectively. The black dots in the figure indicate the areas where the significance passes the 95% test

表 1 退耕后退耕区各参数的变化量^{a)}

Table 1 Change of each parameter in the revegetation area of the Loess Plateau in China

研究区域	Δ NDVI	Δ GET(mm)	Δ Tem($^{\circ}$ C)	Δ Pre(mm)	Δ SWC(%)
全区域(RM)	0.03	7.22	-0.36	44.85	-0.04
Pre<400 mm	0.02	7.32	-0.30	6.89	0.10
400 mm<Pre<600 mm	0.04	8.66	-0.38	56.40	0.03
600 mm<Pre<800 mm	0.01	-4.72	-0.36	65.65	-1.02

a) 退耕后变化量(Δ)=退耕后期均值-退耕初期5年内均值

变率(图4(f), 表1), 其中以年降水量在400~600 mm区域内变化趋势最大. ET变化的空间分布和植被覆盖度的空间分布具有相关性.

2.3 退耕前后ET变化趋势分异的影响因子探究

2.3.1 影响因子的变化趋势

如图5所示, 研究区的温度(Tem)和降水(Pre)格

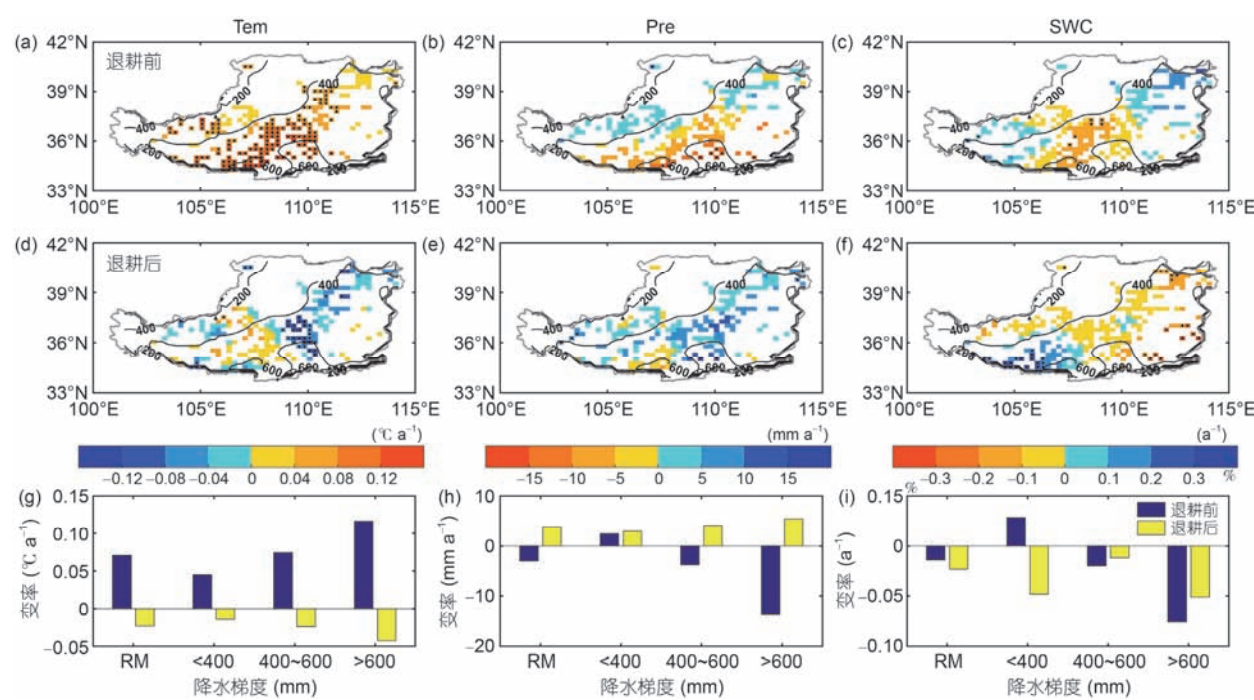


图5 黄土高原退耕区环境因子的空间分布. 退耕前温度(a)、降水(b)及土壤水分(c)的空间分布; 退耕后温度(d)、降水(e)及土壤水分(f)的空间分布; 退耕前后不同降水梯度温度(g)、降水(h)及土壤水分(i)的变化速率对比. $N_{RM}=254$, $N_4=54$, $N_6=179$, $N_8=21$, 其中, N_{RM} 表示全区域内栅格数量; N_4 , N_6 和 N_8 分别表示降水量小于400 mm、降水量在400~600 mm之间及降水量大于600 mm区域的栅格数量. 图中黑色点表示显著性通过95%检验的区域

Figure 5 Spatial variabilities of environmental variables in the revegetation area of the Loess Plateau. Spatial variabilities of temperature (a), precipitation (b) and SWC (c) before the GFGP; spatial variabilities of temperature (d), precipitation (e) and SWC (f) after the GFGP; variabilities of temperature (g), precipitation (h) and SWC (i) of different precipitation gradients before and after the GFGP. $N_{RM}=254$, $N_4=54$, $N_6=179$, $N_8=21$. N_{RM} indicates the number of grids in the entire area; N_4 , N_6 and N_8 represent the number of grids with precipitation less than 400 mm, precipitation between 400 and 600 mm and precipitation greater than 600 mm, respectively. The black dots in the figure indicate the areas where the significance passes the 95% test

局在退耕还林(草)政策实施后均发生了较大变化. 退耕前, 研究区生长季平均温度呈现显著上升趋势(图5(g)); 但退耕后研究区温度呈现显著下降, 增长速率由 $0.075\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 降到 $-0.025\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, ΔTem 达到 $-0.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ (表1). 同温度变化趋势相反, 降雨的变化趋势由退耕前的降低转变为增加. 整个研究区降水显著增加, 在年均降雨量在400 mm及以下的地区更为明显(图5(h), 表1). 与温度和降水的显著变化不同, 退耕区的土壤水分(SWC)总体变化不大, ΔSWC 为 -0.04% , 变率在 0.1% 之内(图5(i), 表1).

2.3.2 主要影响因素探究

为探究退耕区ET的影响因素变化, 采用逐步回归分析对影响退耕区ET变化的环境因子进行筛选(选择NDVI、温度、降水及土壤水分4个变量, 分别将以上变量1982~2015年的数据标准化, 即所选变量值减去均值再除以标准差; 再利用Matlab软件去除线性趋势后进行逐步回归分析). 土壤水分受气候、地形和

植被等多种因素的影响, 同时也显著影响ET变化, 本研究中把土壤水分作为ET的影响因子进行分析. 区域平均结果如表2所示, 经逐步回归筛选并剔除后, 最后保留的是NDVI及土壤水分(SWC)两个变量, 这表明研究区的ET变化主要受到NDVI和SWC的影响. 另外, 本研究同时对每个空间栅格点进行相应的逐步回归分析, 分析表明58%以上的栅格点显示NDVI和SWC是影响退耕区ET变化的主要因子.

因此, 进一步对退耕还林(草)前后ET与NDVI及

表2 逐步回归分析结果

Table 2 Results of the stepwise regression analysis

变量	相关系数	标准差	状态属性
NDVI	[0.7016]	[0.1400]	选入
Tem	[0.0442]	[0.1388]	剔除
Pre	[0.1349]	[0.1296]	剔除
SWC	[0.5984]	[0.1051]	选入

土壤水分(SWC)偏相关的空间分布进行比较,探究退耕前后NDVI(GNDVI)和SWC对ET的影响.结果如图6所示.从ET与NDVI及SWC的偏相关分析结果来看(图6(c)),在退耕还林(草)前各个降水梯度内ET均主要与SWC相关;退耕后情况则刚好相反,1999年退耕后ET的变化主要与NDVI相关,这表明退耕还林(草)工程实施植被增加促使植被的贡献度增加,且随降水梯度的降低NDVI贡献有所增加.

利用广义线性模型,对NDVI和土壤水分(SWC)的贡献率(方差贡献率)进行分析,结果如表3所示.从二者的贡献率分析来看,整个退耕区NDVI的贡献率由退耕前的40.7%($P<0.01$)增长到46.2%($P<0.01$);而SWC的贡献率由退耕前的39.0%($P<0.01$)降低到23.9%($P<0.05$),且二者各降水梯度都存在明显的贡献率变化.贡献率的变化表明在退耕还林(草)前ET主要与SWC相关;而退耕后NDVI对ET的贡献增强.

2.3.3 退耕区退耕后土壤蒸发及植被蒸腾的变化趋势

根据上述探究结果本研究认为植被生长加速是引起退耕后ET变化趋势增加的主要原因,因此,我们进一步利用GLEAM数据将退耕后土壤蒸发(E_s)和植被蒸腾(T)的变化情况进行了对比,结果如图7所示.在黄土高原退耕还林(草)后,退耕区植被蒸腾(T)的变化率大于土壤蒸发(E_s),反映了植被生长对增加ET所做的贡献,证明了植被生长加速是引起退耕后

ET变化趋势增加的主要原因.

3 讨论

流域蒸散发(ET)主要由植被蒸腾、冠层截留蒸发和土壤蒸发组成,深刻地受流域气候条件和下垫面条件的影响.有研究表明,气候变化加剧了水文循环且改变了ET^[3],尤其是在水分限制区域,温度和降水的年际变化控制区域的ET变化和水文循环^[3,33].Li等人^[34]运用SWAT模型在黄土高原的一个农业区域发现1981~2000年气候变化对蒸散发减少的贡献明显高于土地利用变化对蒸散发增加的贡献,气候变化更加显著地影响了地表水文循环.但同时,气候对实际蒸散发的控制作用也受下垫面条件的影响,研究指出^[19],就灌木和草地而言,越干旱的地区温度和降水对ET的影响越小,而越湿润的地区ET越易受到影响.本研究发现,相较于生长季平均温度和总降水量,黄土高原退耕区土壤含水量及植被NDVI变化是ET变化的主要影响因子.但由于蒸散发的复杂性,温度和降水对ET的具体影响还有待进一步深入探究.另外,本研究认为在黄土高原退耕还林(草)后,退耕区植被蒸腾(T)的贡献率大于土壤蒸发(E_s),反映了植被生长对增加ET所做的贡献.但由于ET主控因素在不同的时间和空间尺度上会有所不同,只是在目前的退耕阶段,植被增加植物蒸腾(T)对ET的影响更大;如若未来黄土高原的土壤水分出现进一步亏损的情

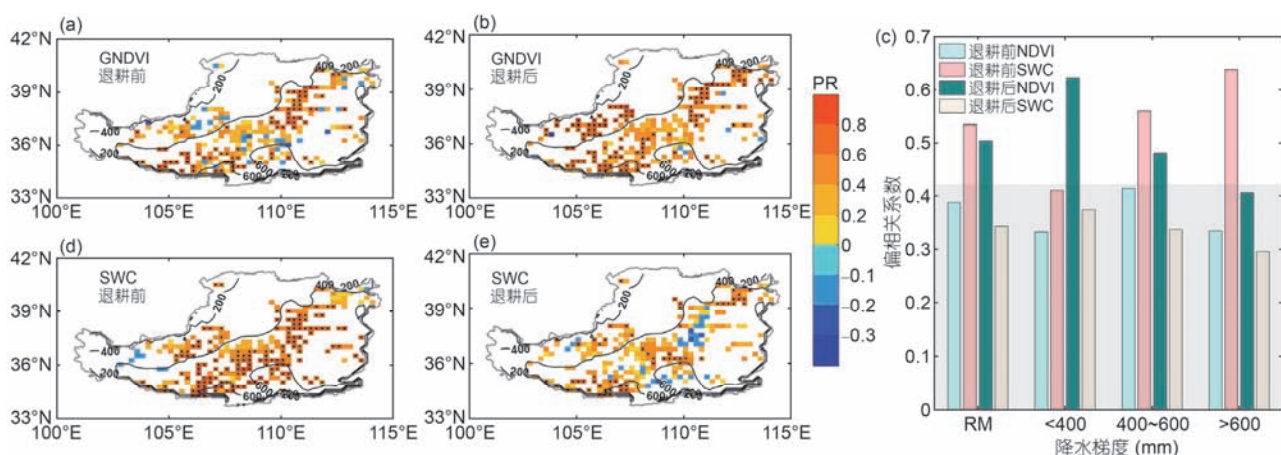


图6 黄土高原退耕区ET与NDVI及SWC的偏相关.退耕前ET与NDVI(a)及SWC(d)偏相关的空间分布;退耕后ET与NDVI(b)及SWC(e)偏相关的空间分布;(c)退耕前后不同降水梯度ET与NDVI及SWC的偏相关对比.(c)中灰色分层区域表示相关系数具有统计学意义($P<0.1$)

Figure 6 Partial correlations between ET and NDVI and SWC in the revegetation area of the Loess Plateau. Spatial variabilities of partial correlation between ET and NDVI (a) and SWC (d) before the GFGP; spatial variabilities of partial correlation between ET and NDVI (b) and SWC (e) after the GFGP; partial correlation between ET and NDVI and SWC of different precipitation gradients before and after the GFGP. The gray shadow in (c) indicates that the correlation coefficient is statistically significant ($P<0.1$)

表3 不同降水梯度下NDVI和SWC对ET影响的贡献率^{a)}
Table 3 Contributions of NDVI and SW to ET in different precipitation gradients

降水梯度 (mm)	退耕前 NDVI(%)	退耕后 NDVI(%)	退耕前 SWC(%)	退耕后 SWC(%)
RM	40.7***	46.2***	39***	23.9**
<400	53.2***	68.7***	18.5**	16.3**
400~600	40.6***	38***	36.7***	22.3**
>600	17.5**	31.6***	46.3***	7.5

a) 表中**, ***分别表示 $P<0.05$, 0.01

况,可能会导致植被生长受限程度加剧,土壤水分对ET的影响将超过植被本身.

由于蒸散发(ET)过程非常复杂,目前遥感估算区域ET还存在很大的不确定性.地表ET时空变化及其控制因素研究一直是全球变化研究的热点问题^[35],尽管本研究对涉及到的主要遥感数据进行了对比分析,但由于卫星观测的系统误差以及数据产品的误差,以及数据分辨率较粗等问题,依旧不能保证所用数据和实地情况完全吻合;同时,虽中国地面通量观测数据已有不少,但黄土高原地区通量站点较少,使得其基于实测资料的研究结果更少.本研究采用的土壤水分数据为再分析数据,虽其空间分辨率相对较粗,但一方面由于本文的研究区域尺度较大,有限的土壤水分地面观测数据难以覆盖整个研究区;另一方面,由于数据的局限性,且长时间大范围的遥感土壤水数据在表层精度相较更高一些,而深层土壤水数据很难大范围的观测,因此本研究选用表层1 m

的土壤水分数据,关于进一步的分析会在后续研究中通过其他方法开展.虽然再分析数据和遥感数据均存在局限,可能给研究结果带来一定的不确定性,但考虑到研究区域、研究时长和研究问题的需求,在数据的选择上进行了一定的取舍,同时我们对数据的可靠性进行了说明和验证.因此,今后研究中运用多数据源、多模型、多方法进行探究是必要的.

4 结论

本文以黄土高原退耕还林(草)区为研究对象,探究了该区域退耕实施前后ET的变化规律及其主要影响因素,主要得出以下结论:

(1) 同退耕前相比较,1999年退耕还林(草)后研究区ET的变化趋势明显增加,且其变率存在较大的空间差异.其中以年降水量在400~600 mm区域内ET的变化趋势最大;

(2) 相较于生长季平均温度和生长季总降水量,退耕区土壤含水量及植被NDVI是影响ET变化的主要环境因子;

(3) 退耕后ET变率的加快更多归因于退耕区植被生长的加速,并且退耕后土壤含水量对ET的贡献度较退耕前普遍降低,而NDVI对ET的贡献度增加;

(4) GLEAM数据表明退耕区植被蒸腾(T)的变化大于土壤蒸发(E_s),即同时考虑二者的情况下,植被蒸腾的变率大于土壤蒸发,表明植被生长对ET的贡献更为显著.

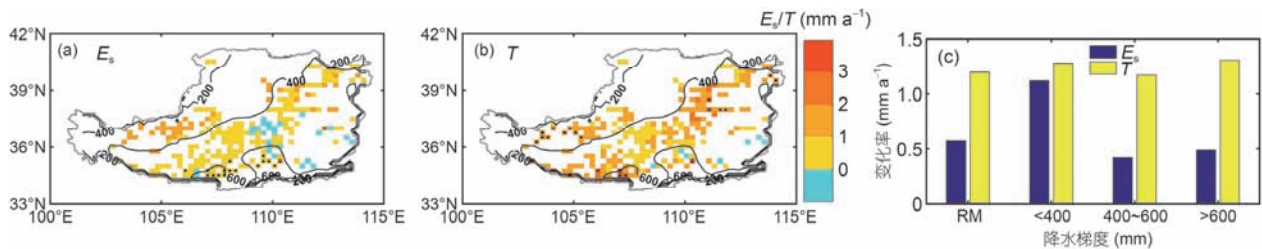


图7 黄土高原退耕区1999年退耕后 E_s 与 T 的变化率.退耕后 E_s (a)及 T (b)的空间分布;(c)不同降水梯度退耕后 E_s 及 T 的变化率
Figure 7 Variabilities of E_s and T after the GFGP in 1999 in the revegetation area of the Loess Plateau in China. Spatial variabilities of E_s (a) and T (b) after the GFGP; (c) variabilities of E_s and T of different precipitation gradients after the GFGP

参考文献

1 Zhang D J, Zhang X X, Wu P F. Relationship between ET and LUCC in a typical watershed of Loess Plateau over the past 20 years (in Chinese). Arid Land Geogr, 2011, 34: 400–408 [张殿君, 张学霞, 武鹏飞. 黄土高原典型流域土地利用变化对蒸散发影响研究. 干旱区地理, 2011, 34: 400–408]
2 Jung M, Reichstein M, Ciais P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. Nature,

- 2010, 467: 951–954
- 3 Qiang L, Yang Z F. Quantitative estimation of the impact of climate change on actual evapotranspiration in the Yellow River Basin, China. *J Hydrol*, 2010, 395: 226–234
- 4 Sun G, Alstad K, Chen J, et al. A general predictive model for estimating monthly ecosystem evapotranspiration. *Ecohydrology*, 2011, 4: 245–255
- 5 Xia J, Liang S, Chen J, et al. Satellite-based analysis of evapotranspiration and water balance in the grassland ecosystems of Dryland East Asia. *PLoS One*, 2014, 9: e97295
- 6 Wang C, Zhen L, Du B Z, et al. Assessment of the impact of Grain for Green Project on farmers' livelihood in the Loess Plateau (in Chinese). *Chin J Eco-Agric*, 2014, 22: 850–858 [王超, 甄霖, 杜秉贞, 等. 黄土高原典型区退耕还林还草工程实施效果实证分析. *中国生态农业学报*, 2014, 22: 850–858]
- 7 Fu B, Yu L, Lü Y, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecol Complex*, 2011, 8: 284–293
- 8 Zhang H Y, Fang N F, Shi Z H, et al. Spatio-temporal patterns for the NDVI and its responses to climatic factors in the Loess Plateau, China (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2016, 36: 3960–3968 [张含玉, 方怒放, 史志华, 等. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应. *生态学报*, 2016, 36: 3960–3968]
- 9 Zhao A Z, Zhang A B, Liu H X, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after Implementation of Grain for Green Project in the Loess Plateau (in Chinese). *J Nat Resour*, 2017, 32: 449–460 [赵安周, 张安兵, 刘海新, 等. 退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析. *自然资源学报*, 2017, 32: 449–460]
- 10 Yi L, Ren Z Y, Zhang C, et al. Vegetation cover, climate and human activities on the Loess Plateau (in Chinese). *Resour Sci*, 2014, 36: 166–174 [易浪, 任志远, 张翀, 等. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系. *资源科学*, 2014, 36: 166–174]
- 11 Shen M, Piao S, Jeong S J, et al. Evaporative cooling over the Tibetan Plateau induced by vegetation growth. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 9299–9304
- 12 Wang S, Fu B, Piao S, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nat Geosci*, 2015, 9: 38–41
- 13 Feng X, Fu B, Piao S, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nat Clim Chang*, 2016, 6: 1019–1022
- 14 Zhai J, Liu R, Liu J, et al. Human-induced landcover changes drive a diminution of land surface albedo in the Loess Plateau (China). *Remote Sens*, 2015, 7: 2926–2941
- 15 Liu J, Tian H, Liu M, et al. China's changing landscape during the 1990s: Large-scale land transformations estimated with satellite data. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L02405
- 16 Liu J, Liu M, Deng X, et al. The land use and land cover change database and its relative studies in China. *J Geogr Sci*, 2002, 12: 275–282
- 17 Pei T, Wu X, Li X, et al. Seasonal divergence in the sensitivity of evapotranspiration to climate and vegetation growth in the Yellow River Basin, China. *J Geophys Res Biogeosci*, 2017, 122: 103–118
- 18 Li S, Liang W, Fu B, et al. Vegetation changes in recent large-scale ecological restoration projects and subsequent impact on water resources in China's Loess Plateau. *Sci Total Environ*, 2016, 569–570: 1032–1039
- 19 Sun Y, Piao S, Huang M, et al. Global patterns and climate drivers of water-use efficiency in terrestrial ecosystems deduced from satellite-based datasets and carbon cycle models. *Glob Ecol Biogeogr*, 2016, 25: 311–323
- 20 Huang M, Piao S, Sun Y, et al. Change in terrestrial ecosystem water-use efficiency over the last three decades. *Glob Change Biol*, 2015, 21: 2366
- 21 Yang Y, Guan H, Batelaan O, et al. Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems. *Sci Rep*, 2016, 6: 23284
- 22 Zeng Z, Wang T, Zhou F, et al. A worldwide analysis of spatiotemporal changes in water balance-based evapotranspiration from 1982 to 2009. *J Geophys Res Atmos*, 2014, 119: 1186–1202
- 23 Yang X Q, Wang G J, Ye J Y, et al. Spatial and temporal changing analysis of terrestrial evapotranspiration in Huai River basin based on GLEAM data (in Chinese). *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2015, 31: 133–139 [杨秀芹, 王国杰, 叶金印, 等. 基于 GLEAM 模型的淮河流域地表蒸散量时空变化特征. *农业工程学报*, 2015, 31: 133–139]
- 24 Miralles D G, Holmes T R H, Jeu R A M, et al. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2011, 15: 453–469
- 25 Wang S S, Yu X X, Liu Z J. Spatiotemporal patterns of NDVI and its responses to temperature and precipitation over Yimeng Mountainous Area (in Chinese). *Remote Sens Technol Appl*, 2014, 29: 61–68 [王丝丝, 于兴修, 刘正佳. 沂蒙山区植被 NDVI 的时空特征及其对水热条件的响应. *遥感技术与应用*, 2014, 29: 61–68]
- 26 Chen Y, Yang K, Jie H, et al. Improving land surface temperature modeling for dry land of China. *J Geophys Res Atmos*, 2011, 116: D20104

- 27 Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q J R Meteorol Soc*, 2011, 137: 553–597
- 28 Ma C C, Yu Y, He J J, et al. Analyses of simulation result in Loess Plateau by WRF Model with two reanalysis data (in Chinese). *Plateau Meteorol*, 2014, 33: 698–711 [马晨晨, 余晔, 何建军, 等. 黄土高原地区两种再分析资料的模拟效果分析. *高原气象*, 2014, 33: 698–711]
- 29 Gou J J, Wang F, Yu E T, et al. Numerical simulation of the feedback of land-cover change on regional climate in the Loess Plateau (in Chinese). *Arid Land Geogr*, 2017, 40: 850–859 [苟娇娇, 王飞, 于恩涛, 等. 黄土高原地区土地覆盖变化对气候的反馈作用数值模拟. *干旱区地理*, 2017, 40: 850–859]
- 30 Pan L J, Zhang H F, Zhou Y Q, et al. Spatial-temporal distribution of summer cloud water resources over the Loess Plateau from 1979 to 2012 (in Chinese). *J Des Res*, 2015, 35: 456–463 [潘留杰, 张宏芳, 周毓荃, 等. 1979–2012 年夏季黄土高原空中云水资源时空分布. *中国沙漠*, 2015, 35: 456–463]
- 31 Liu J P, Li B L, Zhang G K. Quantitative analysis of the wetland distribution law and its influencing factors in Heilongjiang Province (in Chinese). *J Northeast For Univ*, 2005, 33: 65–67 [刘吉平, 李宝林, 张国坤. 黑龙江省湿地空间分布规律及其影响因素的定量分析. *东北林业大学学报*, 2005, 33: 65–67]
- 32 McCullagh P M, Nelder J A S. *Generalized Linear Models*. 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1989
- 33 Goyal R K. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: A case study of arid zone of Rajasthan (India). *Agric Water Manage*, 2004, 69: 1–11
- 34 Li Z, Liu W, Zhang X, et al. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. *J Hydrol*, 2009, 377: 35–42
- 35 Yang X Q, Wang G J, Pan X, et al. Spatio-temporal variability of terrestrial evapotranspiration in China from 1980 to 2011 based on GLEAM data (in Chinese). *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2015, 31: 132–141 [杨秀芹, 王国杰, 潘欣, 等. 基于 GLEAM 遥感模型的中国 1980–2011 年地表蒸散发时空变化. *农业工程学报*, 2015, 31: 132–141]

Summary for “退耕还林还草工程加剧黄土高原退耕区蒸散发”

The Grain for Green Project intensifies evapotranspiration in the revegetation area of the Loess Plateau in China

Yashu Wang^{1,2}, Xiaoyan Li^{1,2*}, Fangzhong Shi^{1,2}, Shulei Zhang^{1,2} & Xiuchen Wu^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

² School of Natural Resources Science, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

* Corresponding author, E-mail: xyli@bnu.edu.cn

The Grain for Green Project (GFGP) in China's Loess Plateau significantly influences regional vegetation growth and water cycles, especially the inter-annual variability of terrestrial evapotranspiration (ET). In this study, we analyzed the spatial-temporal variations of ET and its driving factors before the period of (1982–1997) and after implementing of the GFGP in the revegetation area of the Loess Plateau during 2001–2015. Firstly, three sets of ET products are collected herein, including global flux product evapotranspiration (FLUXNET ET, FET), model simulation WB-MTE-ET (WET) and GLEAM ET (GET). To evaluate the performance of the ET products in the Loess Plateau, we calculated the mean annual streamflow (Q_{mod}) based on the water balance equation with three sets of ET products against the observed mean annual streamflow (Q_{obs}) at seven catchments over the Loess Plateau. The results indicated that Q_{mod} estimated from GET shows the best agreement with Q_{obs} in terms of both spatial ($R^2=0.97$, $P<0.01$) and temporal ($R^2=0.94$, $P<0.01$) variations. Thus, we selected GLEAM ET (GET) products in the following analysis. Secondly, we analyzed the trend of annual NDVI and ET in the growing season before and after implementing of the GFGP in the revegetation area using the linear regression. Furthermore, we conducted the stepwise regression analysis to identify the controlling factors that affect the ET changes in the revegetation area during different period. The environmental factors included soil moisture, air temperature, precipitation and averaged Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) during the growing season. The results showed that: (1) The inter-annual variability of ET in the revegetation area was significantly increased after implementing of the GFGP compared with that before the GFGP. The inter-annual ET variability also exhibited great spatial differences which showed the highest peak in the regions with annual precipitation ranging from 400 to 600 mm a^{-1} . (2) Compared with the mean air temperature and total precipitation in growing-seasons, the variation of NDVI contributed the most to the changes in ET followed by the soil water content. (3) After implementing of the GFGP, the contribution of the soil water content to ET variation has generally declined, while the contribution of NDVI has increased. This study reveals the influence of the GFGP on the regional water cycle in terms of ET variation, which is of guiding importance to the ecological engineering construction, as well as the rational water resources allocation.

Loess Plateau, Grain for Green Project, revegetation area, evapotranspiration

doi: 10.1360/N972018-00515