



退耕还林工程实施背景下黄土高原大气水循环研究

花 婷^{1,2}, 杜家慧¹, 张远翥¹, 许佳杰¹

1. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127

摘要 在大规模“退耕还林”工程的实施下,近几十年来黄土高原呈现显著的植被恢复趋势,深刻影响了该地区的水循环过程。为明确生态恢复工程对大气水循环的影响,基于MERRA-2数据和水汽溯源模型,分析了1991年至2020年间黄土高原生长季降水量、蒸发、水汽通量及其散度以及降水再循环率等大气水循环关键要素的时空变化特征。结果表明:①1991至2020年间,黄土高原降水量和蒸发量均呈显著增加趋势,其中降水增加速率明显高于蒸发量的增加速率;②在降水增加趋势背景下,黄土高原的降水资源量增加速率约为 $0.352 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$,其中源自外部源区和本地蒸散发的水汽贡献量均呈显著增加趋势;③虽然降水增量所需的水汽主要依赖于外部源区额外贡献,但近30年来由于退耕还林工程的实施,使得该地区生长季的降水再循环率显著增加,增加速率为 $0.0483\%/\text{a}$,表明大规模的生态恢复工程对本地区大气水循环产生积极的作用。结果对阐明大规模生态恢复工程对当地水文过程和气候系统的驱动机制具有重要意义。

关键词 黄土高原;降水量;蒸发量;大气水循环

中图分类号:K903 **DOI:**10.16152/j.cnki.xdxbr.2026-04-016

Atmospheric water cycle over the Loess Plateau under the implementation of the Grain for Green project

Hua Ting^{1,2}, Du Jiahui¹, Zhang Yuanzhu¹, Xu Jiajie¹

1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China

Abstract Under the implementation of the Grain for Green project, a significant vegetation restoration trend has been observed on the Loess Plateau in recent decades, which has profoundly affected the regional water cycle. To investigate the effects of ecological restoration projects on the atmospheric water cycle, we analyzed the temporal and spatial variations in the key variables (including precipitation, evaporation, water vapor flux and its divergence, and precipitation recycling ratio) on the Loess Plateau during the 1991–2020 growing seasons, based on the MERRA-2 data and the moisture tracking model. The research has 3 results. ①From 1991 to 2020, both precipitation and evaporation showed significantly increasing trend over the Loess Plateau, and the trend in precipitation is higher than that of evaporation. ②Under an increasing precipitation trend, the precipitation resources on the Loess Plateau increased at approximately $0.352 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$, with both external

收稿日期:2025-11-25 修回日期:2026-01-21

基金项目:国家自然科学基金(42271012)

第一作者:花婷,女,副教授,从事干旱区气候变化研究,thua@nwu.edu.cn。

通信作者:杜家慧,女,硕士研究生,从事大气水循环研究,202322330@stumail.nwu.edu.cn。

moisture sources and local evaporation exhibiting significant increases in absolute water vapor contribution. ③ Although the increased precipitation primarily depends on additional contributions from external moisture source regions, the precipitation recycling ratio during the growing season over this region has increased significantly over the past 30 years due to the implementation of the GrainforGreen project, with an increasing rate of 0.048 3% /a. This indicates that large-scale ecological restoration projects have exerted a positive effect on the regional atmospheric water cycle. The research findings of are of great significance for elucidating the driving mechanisms of large-scale ecological restoration projects on local hydrological processes and climate systems.

Keywords the Loess Plateau; precipitation; evaporation; atmospheric water cycle

自21世纪以来,黄土高原生态恢复工程取得了显著成效,在过去二十多年里,黄土高原呈现出明显的植被绿化趋势^[1-2],截至2020年黄土高原恢复植被总面积达 $5.26 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[3]。如此大规模的植被绿化深刻改变了这一区域的水循环过程^[4]。现有研究主要关注植被恢复引起的地表和地下水文过程的变化^[5-10],普遍认为植树造林将额外消耗水资源,加剧水资源短缺问题^[11-12],导致土壤干旱化^[10]、地下水位下降^[5]等问题。尽管一些学者认为森林覆盖度的增加可以促进水蒸气的大规模输送,增加降水再循环率并促进降水过程的发生,以此对大气水循环产生积极影响^[13-14],但是有关生态恢复工程对黄土高原地区大气水循环影响的相关研究仍然相对较少。

在大气水循环中,蒸散发和降水是连接陆地和大气之间水分和能量交换最重要的要素。虽然有研究认为气候变化和太阳辐射是影响蒸散发变化的关键因素^[15],然而近年来植被绿化已逐渐成为蒸散量变化的主要驱动因素^[16-19]。由于退耕还林工程的实施,大部分研究表明黄土高原区域整体蒸散发呈现明显增加趋势^[20-22]。在大规模生态恢复工程的实施下,虽然黄土高原总蒸散发量呈现增加趋势,但其内部各组分存在不同的变化趋势:整体上植被蒸腾量(或植被蒸散发分量)呈显著增加趋势,而土壤蒸发分量呈减少趋势^[23]。这主要是由于大规模植被恢复通过增加蒸腾量和反照率的变化进而改变地表蒸散组分变化:①从能量角度来看,植被覆盖度增加的遮挡作用将导致地表接收到的太阳辐射减少,从而用于土壤蒸发的能量减少^[24-25];②从水分角度来看,植被绿化增强了蒸腾速率,植被蒸腾消耗了更多的水分,导致黄土高原有限的水资源被更多地用于植被蒸腾,而用于土壤蒸发的水分则呈减少趋势^[26-27]。

降水作为黄土高原生态系统和农业生产的主

要环境限制因子^[28-30],是这一地区最主要的水资源来源。由于黄土高原位于季风边缘区,因此具有年际变化显著及季节性变化大的区域气候特征。就水汽来源的角度而言,一个地区降水或来源于外部水汽输入,或来源于本地蒸散发。大规模植被变绿伴随的蒸散发增强使得更多源自本地蒸发的水汽参与降水过程^[31],从而对当地降水产生独特的影响。然而,关于植被恢复对降水的作用,目前研究结论并不一致。有学者发现,植被恢复将增加降水再循环率,导致黄土高原每年产生额外的降水,表明植被恢复为降水增加创造了有利的水文条件^[13,32]。也有研究提出蒸散量增加可能有助于本地水汽供给,但同时还会带来地表径流减少和土壤水分消耗加剧,在黄土高原这一干旱半干旱地区甚至可能引发或加剧水资源短缺问题^[24,33-34]。此外,植被蒸腾作用吸收潜热还会伴随近地面的冷却效应(cooling effect),使得大气层结变得更加稳定,更加不利于降水过程的发生^[35]。

除了本地蒸发,黄土高原地区的降水过程更主要来自于上游地区水汽输入。其中,源自黄土高原南部和西南部区域的水汽输入主导了黄土高原降水的变化^[36-37],并且大气环流对黄土高原地区降水的增加贡献了近2/3^[7]。植被恢复可以通过局地陆气反馈过程来促进降水的增加,但区域降水量变化仍显著依赖于大尺度大气环流的调控^[38]。若缺乏大气环流的相应变化,降水的增加量难以超越蒸散发的增加量,植被恢复后的总水量收支也会呈现出不同格局。黄土高原位于中国中北部农牧交错带,该地区降水受东亚季风系统和西风带的共同控制。其中源自印度季风和东亚季风的水汽输送占主导地位,其变化是黄土高原雨季降水年际变化的主要控制因素;同时,西风带输送的水汽也发挥着不可忽视的作用^[39-40]。为了探究退耕还林工程对黄土高原大气水循环的

影响,本文基于 MERRA-2 数据和水汽溯源模型(dynamical recycling model, DRM)^[41-42],分析 1991 年至 2020 年间黄土高原生长季(4—9 月)降水量、蒸散发、水汽通量及其散度以及降水再循环率等大气水循环关键要素的时空变化特征。明确植被恢复对黄土高原大气水循环的作用,对于科学评估植被恢复工程的水文效应、优化水土保持策略以及实现水资源的可持续管理,促进黄土高原人地关系的和谐发展具有至关重要的理论与现实意义。

1 数据源与方法

1.1 数据源

本文采用 1991—2020 年间 MERRA-2 再分析数据(modern-era retrospective analysis for research and applications, Version 2)^[43],要素包括降水、蒸散发、水汽通量(其计算公式详见 1.2 节)等资料,数据可从 <https://disc.gsfc.nasa.gov> 下载,该数据的空间分辨率为 $0.625^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。此外,为了验证降水资料的精度,还采用了覆盖整个黄土高原范围共 306 个的降水站点资料,空间分布如图 1(a)所示,时间分辨率为月尺度,该数据源于国家气象信息中心提供的中国地面气候信息日值数据集的数据库(<http://data.cma.cn>)。逐月气象站点降水数据已被验证具有一致的时空变化^[44],区域平均降水的时间序列是对 306 个站点的等权重平均。

1.2 方法论

1.2.1 趋势分析

本文采用 Mann-Kendall(M-K)趋势检验方法^[45-46]来识别黄土高原降水量、蒸发量等气象要素随时间的长期变化趋势。

对于时间序列 $X = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$,M-K 检验统计量 S 的计算公式如下:

1) 秩序统计量 S

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \operatorname{sgn}(x_j - x_i) \tag{1}$$

2) 符号函数 $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 定义为

$$\operatorname{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{当 } (x_j - x_i) > 0 \\ 0, & \text{当 } (x_j - x_i) = 0 \\ -1, & \text{当 } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \tag{2}$$

3) 标准化检验统计量 Z 的计算公式为

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}}, & \text{当 } S > 0 \\ 0, & \text{当 } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}}, & \text{当 } S < 0 \end{cases} \tag{3}$$

4) 统计量 S 的方差 $\operatorname{Var}(S)$ 的计算公式为

$$\operatorname{Var}(S) =$$

$$\frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^m t_j(t_j-1)(2t_j+5)}{18} \tag{4}$$

式中: n 为样本数, t_j 为序列中的第 j 个值, m 为序列中拥有相同值的总数, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数, $\operatorname{Var}(S)$ 为 S 的方差, Z 为标准化检验统计量。 $Z > 0$ 表示序列呈上升趋势, $Z < 0$ 表示序列呈下降趋势。在给定显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下,若 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$,则认为序列存在显著的变化趋势,其中 $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$,为标准正态分布的上侧分位数。

1.2.2 水汽通量的计算

为探究黄土高原上空水汽输送通量的时空变化特征,计算了整层水汽通量垂直积分($\bar{Q}$)。整层水汽通量的垂直积分可以由比湿和风速垂直积分得来

$$\bar{Q} = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{300 \text{ hPa}} q \bar{v} dp \tag{5}$$

式中: p_s 为地面气压,hPa; q 为比湿,kg/kg; $\bar{v}$ 为风速,m/s; p 表示压力,hPa; g 代表重力加速度,m/s²。整层水汽通量垂直积分的纬向分量 Q_u 和经向分量 Q_v 表达式分别为:

$$Q_u = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{300 \text{ hPa}} q u dp \tag{6}$$

$$Q_v = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{300 \text{ hPa}} q v dp \tag{7}$$

式中: u, v 分别表示纬向风速和经向风速,m/s。由于大气水汽主要集中在对流层的中低层,因此积分上限为 300 hPa。

此外,为了分析黄土高原总水汽通量收支状况,还计算了进出黄土高原 4 个边界的总水汽通量。具体而言,分别计算东、西边界纬向总水汽通量,以及南、北边界经向总水汽通量,计算公式如下

$$F_x = Q_u L_y \tag{8}$$

$$F_y = Q_v L_x \tag{9}$$

式中: F_x 和 F_y 分别表示纬向和经向的总水汽通量,kg/s; Q_u 和 Q_v 分别表示纬向和经向的整层水汽通量,kg/(m·s); L_x 表示南北边界的总纬向长

度, m ; L_y 表示东西边界的总经向长度, m 。

1.2.3 降水再循环率

由于退耕还林工程伴随的下垫面植被状况变化通过改变地表进入大气的水汽含量(即蒸散发)进而影响降水等大气水循环过程,因此降水再循环率(即降水中源自本地蒸发的比例)的变化体现了退耕还林工程对区域大气水循环的影响。为此,本文采用动态水汽溯源模型(dynamic recycling model, DRM)^[41-42]对黄土高原生长季降水进行水汽溯源。DRM 动态水汽溯源模型是基于大气水分平衡方程的半拉格朗日式水汽溯源模型,通过沿着水汽溯源轨迹计算沿途蒸散发相对于总水汽含量的比例进行积分,进而得到沿途不同区域对于目标区(即黄土高原)降水的相对贡献率,其驱动数据包括多层风场、湿度场以及地表蒸发、降水、近地面气压等,这些数据均来自于 MERRA-2 再分析资料^[43]。根据由 MERRA-2 数据驱动的 DRM 模型输出结果,我们从源区中计算黄土高原区域内所有格点相对贡献率总和,就能得到 1991—2020 年间黄土高原降水再循环率的变化,并将其与降水量和蒸散发时间序列进行对比。此外,为了便于展示退耕还林工程对整个大气水循环过程的影响,本文还将 1991—2020 年期间分为两个相等的子时段,对比分析 1991—2005 年间和 2006—2020 年间生长季平均大气水循环关键要素(包括蒸发、降水、水汽输送、降水再循环率等)的差异。

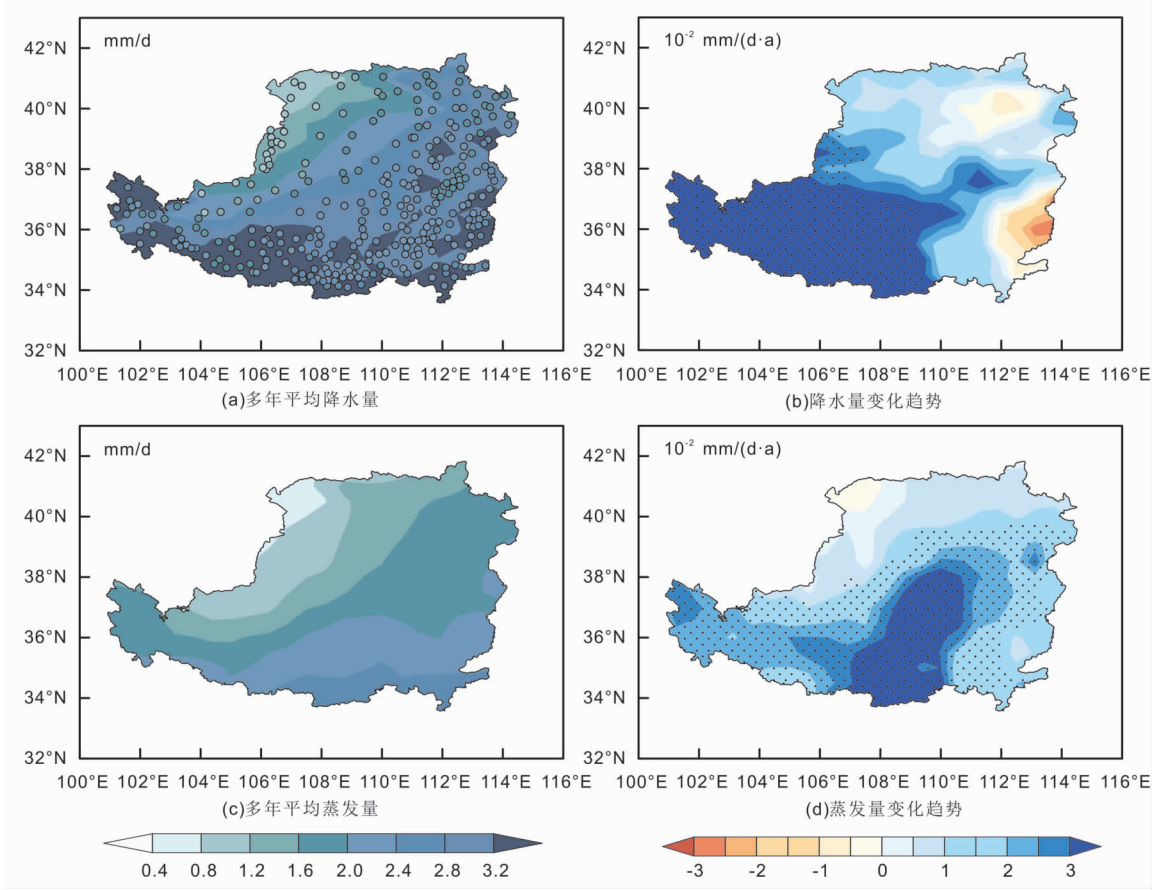
2 结果与分析

2.1 黄土高原降水量和蒸散发的时空变化特征

近 30 年来,黄土高原生长季年平均 MERRA-2 降水资料与气象站点降水数据的空间格局基本一致,均呈现出自东南向西北递减的空间分布格局[见图 1(a)]。然而在绝对数值方面,再分析降水资料在黄土高原东部和南部边缘山区则明显高于站点降水资料,这一高估可能与气象观测站点架设位置有关。为了便于日常维护,气象站主要架设在相对低海拔的平坦地区,难以反映由于

山区地形强迫带来的降水增强效应,而 MERRA-2 再分析资料由于考虑了地形效应因此得到的降水资料在山区相对高估。然而,虽然黄土高原区域平均的再分析降水序列整体存在高估(见图 2 蓝线),但二者在年际波动方面展现了很高的一致性,其线性相关系数高达 0.877 ($p < 0.01$, 见图 2)。这些结果表明,即便在黄土高原的部分地区存在高估的情况下, MERRA-2 降水资料仍然可以很好地反映出黄土高原地区生长季降水的空间分布和变化规律。1991 年至 2020 年间,区域平均的再分析和站点时间序列均显示黄土高原的生长季降水呈显著增加趋势($p < 0.01$, 见图 2),其增加速率分别为 $2.67 \times 10^{-2} \text{ mm}/(\text{d} \cdot \text{a})$ 和 $1.47 \times 10^{-2} \text{ mm}/(\text{d} \cdot \text{a})$ 。即便整体呈现增加趋势,但其在黄土高原内部存在较大的空间差异性。在黄土高原西南部递增趋势最强且通过显著性检验($p < 0.05$),局地降水增加速率超过 $0.03 \text{ mm}/(\text{d} \cdot \text{a})$ [见图 1(b)],而在黄土高原东部边缘区存在部分零散分布的区域降水呈略微减少的变化趋势。

黄土高原多年平均的生长季蒸散发同样呈现出自东南向西北递减的空间分布格局[见图 1(c)],这一格局与降水量分布相一致,这主要是由于黄土高原属于干旱半干旱区,该地区的蒸散发属于水分限制型而非能量限制型^[47],而降水是影响这一地区土壤水分的关键。1991 年至 2020 年间,黄土高原区域平均蒸发呈现显著增加趋势($p < 0.01$),但其增加速率 [$1.87 \times 10^{-2} \text{ mm}/(\text{d} \cdot \text{a})$] 小于降水增加速率(见图 2)。另一方面,在变化趋势的空间分布方面,除了西北部零星区域外,黄土高原几乎绝大部分区域的生长季蒸发量均呈现出增加趋势,并且绝大部分(东南部)区域的变化趋势通过显著性为 0.05 的检验[见图 1(d)]。其中,中南部的增加速率最大,速率约为 $0.03 \text{ mm}/(\text{d} \cdot \text{a})$,并由中南部向周边逐渐减弱,这一区域与黄土高原植被恢复最明显的区域相对应^[48],体现了生态恢复对蒸散发的显著促进作用。



注:其中右列中变化趋势通过显著性水平为 0.05 检验的用黑点突出显示。图(a)中的彩色圆点表示气象站年平均降水量,其填色等级与底图相同(MERRA-2 降水资料)。

图 1 1991 年至 2020 年间黄土高原生长季降水和蒸发量的多年平均和变化趋势分布

Fig. 1 Patterns in the multiyear average and change trend of precipitation and evaporation during the growing season from 1991 to 2020

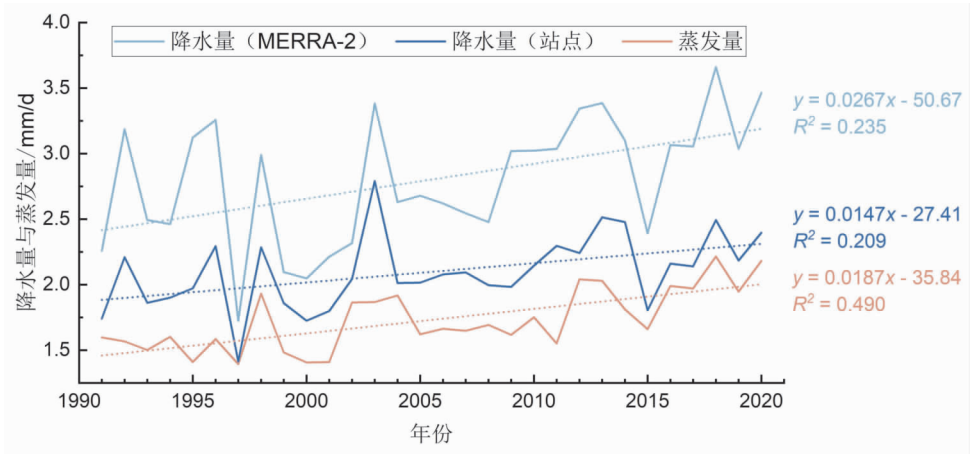


图 2 黄土高原区域平均的生长季降水(MERRA-2 和气象站点资料)和蒸发量(MERRA-2)随时间的变化

Fig. 2 Time series of regional mean precipitation (MERRA-2 and meteorological station data) and evaporation (MERRA-2) over the Loess Plateau during the growing season

2.2 黄土高原上空水汽输送通量的时空变化特征

在生长季,黄土高原上空盛行偏西风,但具体

而言,在其北部地区上空主要受偏西风控制,在其南部上空则受西南风影响[见图 3(a)],这表明

黄土高原生长季的水汽输送主要受东亚夏季风^[49-50]和西风^[51]的影响。在这一水汽输送通量配置下,水汽主要从黄土高原的西边界和南边界输入,并通过东边界和北边界输出。由于盛行偏西风,因此纬向水汽通量(东、西边界)整体高于经向水汽通量(南、北边界)。其中,纬向水汽通量的分布呈现出自西向东水汽通量逐渐增大的趋势,因此东边界平流水汽流出量大于西边界水汽

流入量,在纬向方向上黄土高原上空的水汽为净支出(见图 3、图 4)。在经向方向上,从南边界输入黄土高原的总水汽通量高于从其北边界输出的水汽通量,因此南北方向上黄土高原水汽为净收入。因此,就黄土高原整体水汽收支来看,黄土高原经向水汽收支净输入为 $34.27 \times 10^6 \text{ kg/s}$,而纬向方向的水汽净支出为 $35.13 \times 10^6 \text{ kg/s}$,二者相抵后水汽通量为略微净支出 $0.86 \times 10^6 \text{ kg/s}$ 。

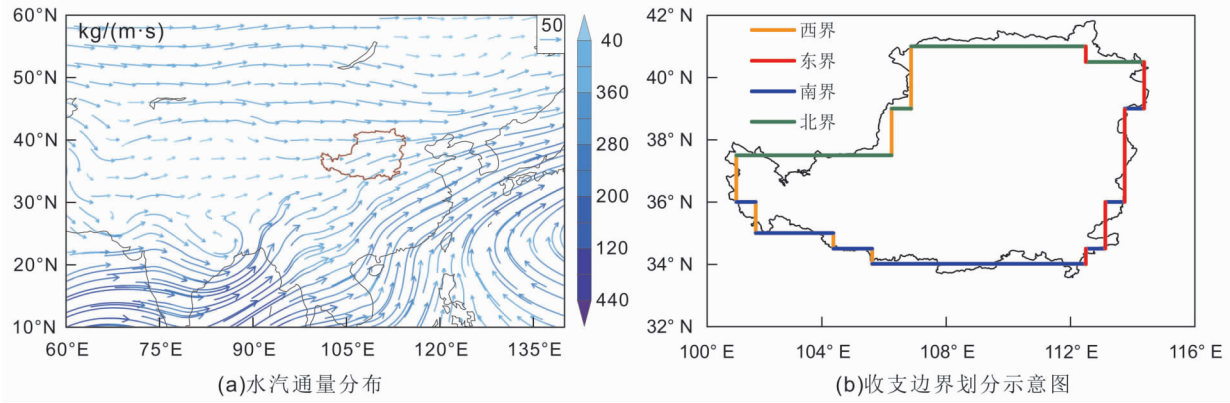
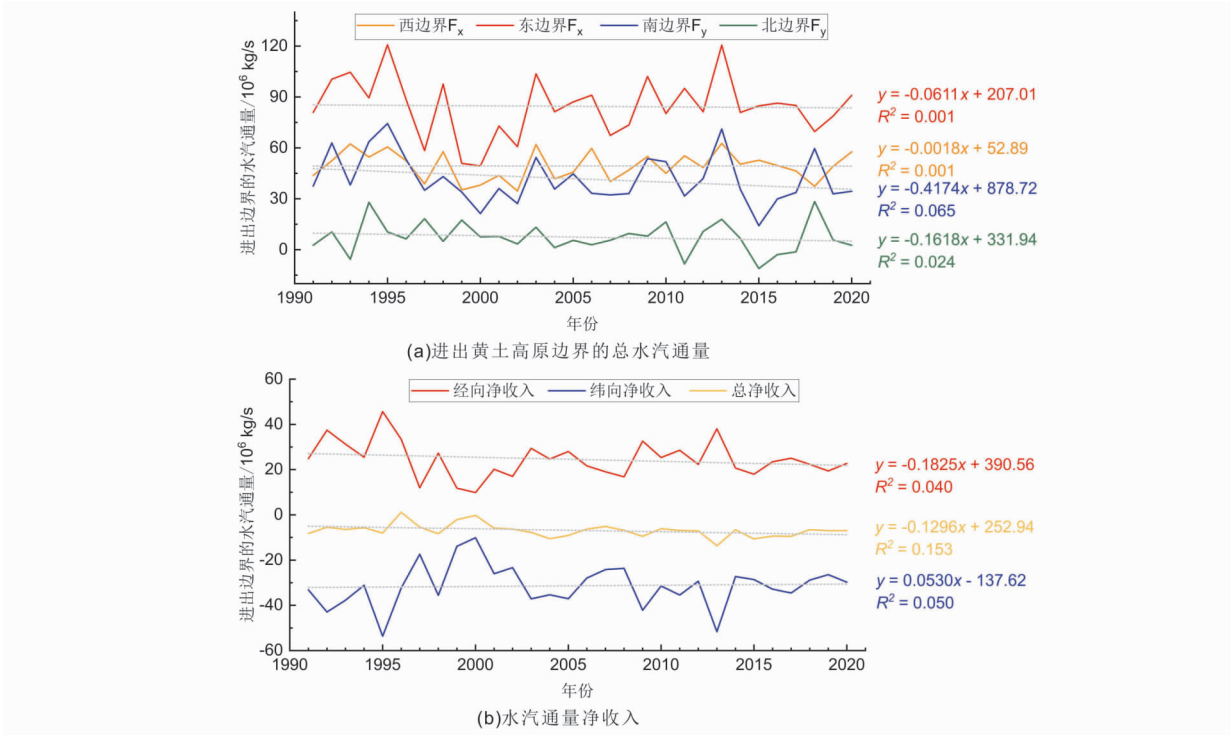


图 3 1991 年至 2020 年间黄土高原上空整层大气的水汽通量分布

Fig. 3 The distribution of vertical integral water vapor flux over Loess Plateau from 1991 to 2020



注:灰色虚线表示线性拟合线,其拟合方程用对应颜色列出。

图 4 生长季进出黄土高原边界的总水汽通量和水汽通量净收入随时间的变化

Fig. 4 Time series of total moisture flux across the boundaries and the net income of moisture flux of the Loess Plateau

1991 至 2020 年间,进出黄土高原边界的整层水汽通量呈明显的年际波动,且通过 4 个边界

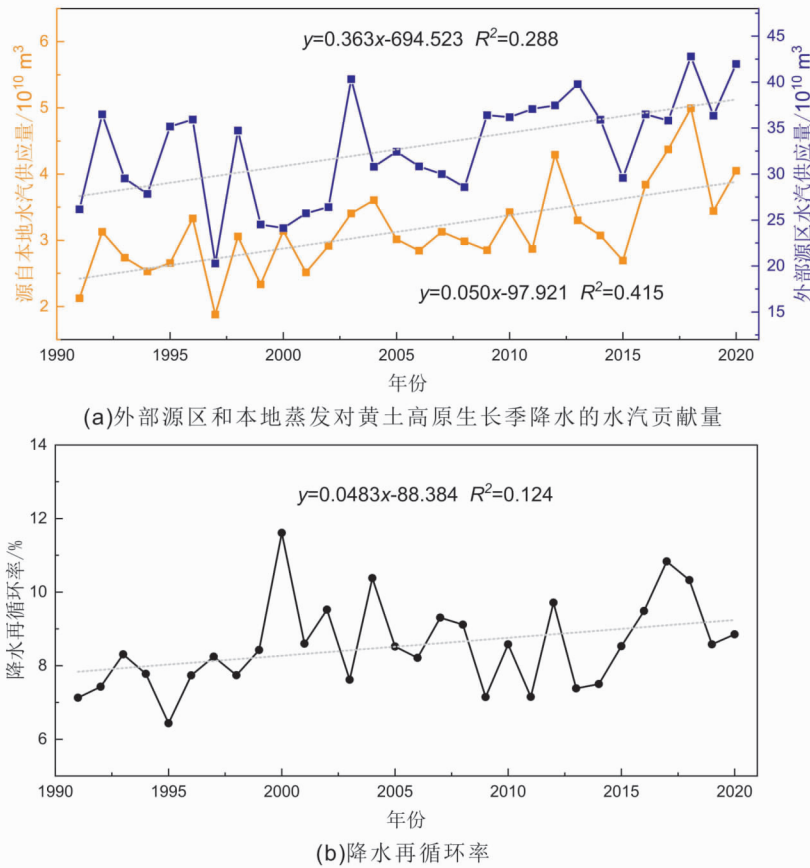
的水汽通量均呈现出下降趋势(均不显著),总体上南北方向水汽通量减少趋势明显大于东西方向

的减少趋势。其中在东西方向上,西边界输入的水汽通量减少趋势明显大于东边界输出的量〔见图 4(a)〕,使得其在纬向上的水汽通量净支出呈减少趋势,见〔图 4(b)〕蓝色线。因为是负值支出项,因此其绝对量减少在变化趋势上显示为正值,使得纬向水汽净损失态势得以缓解,缓解的趋势为 $0.053 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{a})$;在南北方向上,从南边界输入的水汽通量减少趋势同样大于从北边界输出的量,导致其经向净收入呈减少趋势,见〔图 4(b)〕红线,减少趋势为 $-0.183 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{a})$;整体上,黄土高原水汽呈净支出状态,且这一净支出绝对值仍处于增加趋势,增加速率为 $0.130 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{a})$,见〔图 4(b)〕黄线。

2.3 退耕还林工程对黄土高原上空大气水循环的影响

黄土高原年均生长季降水量约为 $2.8 \text{ mm}/\text{d}$ (即 $512 \text{ mm}/183 \text{ d}$),相当于 $37.01 \times 10^{10} \text{ m}^3/183 \text{ d}$ 的降水资源量,其中约为 8.54% 源自于本地蒸发,即平均每年黄土高原本地蒸散发为该地区降

水大约贡献 $3.16 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 的水资源,而剩余 91.46% 的水汽仍然来源于外部源区的水汽输入。由于空间范围相对有限且为半干旱半湿润气候特征,因此黄土高原的降水再循环率相对较小^[52]。1991 至 2020 年间,黄土高原生长季降水增加趋势为 $0.0267 \text{ mm}/(\text{d} \cdot \text{a})$,相当于平均每年增加的降水资源量为 $0.352 \times 10^{10} \text{ m}^3$,其中源自外部源区和本地的绝对贡献量均呈显著增加趋势,见图 5(a),其中外部源区的水汽贡献量增加趋势为 $0.302 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$,而本地蒸发的贡献增加趋势为 $0.050 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ 。虽然外部源区和本地蒸散发对黄土高原降水的水汽贡献量均呈增加趋势且外部贡献占主导,但进一步分析发现源自本地的降水再循环率呈显著增加趋势〔 $0.0483\%/\text{a}$, $p < 0.05$,见图 5(b)〕。这些结果表明,虽然黄土高原降水增量需要的水汽绝大部分来源于外部源区额外供应,但源自本地区蒸散发的比例仍然有明显提升。



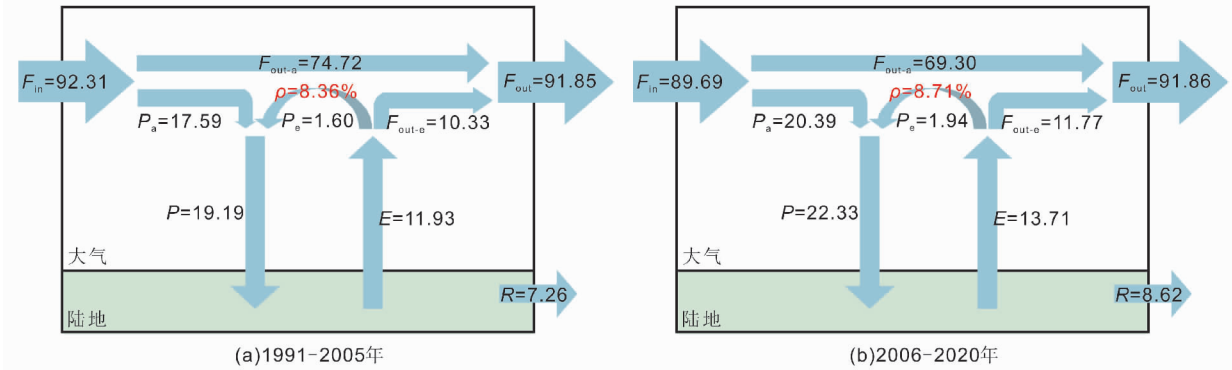
注:灰色虚线表示线性拟合直线。

图 5 外部源区和本地蒸发对黄土高原生长季降水的水汽贡献量以及降水再循环率随时间的变化

Fig. 5 Time series of the absolute moisture contribution from external sources and local evapotranspiration to growing season precipitation over the Loess Plateau and its precipitation recycling ratio

此外,还分析了在实施退耕还林工程前后两个相等时间段的黄土高原大气水循环关键要素变化(见图 6)。其中 P 是该区域降水量, E 是该区域蒸发量, F_{in} 和 F_{out} 是输入和输出黄土高原的总水平水汽通量; P_a 是降水量中源于外部源区水汽输入的分量, P_e 为降水量中源自本地蒸发的分量, ρ 是降水再循环率; F_{out-a} 是不参与降水而直接被平流输出本区域的水平水汽通量, F_{out-e} 是本地蒸发量被平流输出的分量。结果显示,无论是在工程实施前还是实施后,外部平流对黄土高原水汽贡献量都明显大于本地蒸发对降水的水汽贡献,这表明黄土高原的降水仍然主要依赖于外部水汽的平流输送,而由本地蒸发贡献的再循环降水仅占少部分。植被恢复后,黄土高原降水再循环率有明显的增加,由退耕还林之前的 8.36% 增加至 8.71%,降水中源自本地蒸发的水量也由 1.60×10^6 kg/s 增加到了 1.94×10^6 kg/s,这表明本地蒸

发对降水有明显的促进作用。从外部水汽贡献来看,植被恢复后的降水源于外部源区的水汽输入(20.39×10^6 kg/s)大于植被恢复之前的水汽输入(17.59×10^6 kg/s),植被恢复使得外部平流水汽参与黄土高原降水过程的绝对量增多,这表明外部大气平流对降水的发生起到了一定的促进作用。另外,退耕还林工程实施后,黄土高原降水量与蒸发量均呈现显著增加趋势,而外部水汽的平流输入与输出通量变化却十分微弱。因此,植被恢复对区域降水的影响并非主要通过改变外部水汽输送,而是通过增强局地陆气间相互作用,促进了内部水汽的再循环过程,从而促进降水的发生^[13,32]。植被恢复后黄土高原地表径流也有了明显的增加,由植被恢复之前的 7.26×10^6 kg/s 增加到了 8.62×10^6 kg/s,这主要是因为区域降水量的增加超过了植被恢复造成的蒸散量的增加^[7]。



注:所有要素(黑色数字显示)的单位均为 10^6 kg/s,其中降水再循环率 ρ (红色数字显示) 是基于由 MERRA-2 数据驱动的 DRM 模拟结果得出,其余数据均来源于 MERRA-2 再分析数据。

图 6 黄土高原年均大气水循环示意图

Fig. 6 Schematics of the annual water cycle over Loess Plateau

3 讨论

由于再分析资料是同化了多源观测资料的气候模式输出结果,因此 MERRA-2 再分析资料中的各水文气象要素(如蒸发、降水、水汽通量、大气水汽含量等)之间能够较好地满足水分收支平衡这一约束条件。因此,为了尽可能地使区域水分平衡方程得以闭合,有必要采用 MERRA-2 降水资料来分析黄土高原大气水循环过程。而 MERRA-2 再分析资料的精度验证结果表明,虽然与气象站点降水资料相比,MERRA-2 再分析降水资料在黄土高原东南部山区存在一定程度的高估,但两种数据源在降水的时空变化方面均存在

较高的一致性。无论是空间范围均体现出由东南向西北递减的分布格局,还是随时间变化方面(均呈显著增加趋势;年际变化方面相关系数达 0.877, $p < 0.01$; RMSE 为 0.754)。因此,能够采用 MERRA-2 降水数据来分析黄土高原生长季降水的时空分布特征。

本文利用 MERRA-2 再分析资料以及 DRM 溯源模型,探究了退耕还林工程的实施对黄土高原大气水循环过程的影响。结果显示,退耕还林工程不仅显著促进了地表蒸散发、减缓了该地区上空水汽通量净支出损耗,且导致近 30 年来黄土高原生长季降水增量中来源于本地蒸散发的比例显著增加,表明植被恢复通过增强蒸散发显著促进了当地降水过程^[13]。这一结果与其他研究者

基于不同的溯源模型和驱动数据得到的结果相一致^[32,53],例如 Cao 等基于 WAM-2layers 模型和 ERA-5 再分析资料,发现黄土高原降水再循环率由退耕还林之前的 6.9% 增加到工程实施之后的约 8.3%^[53],表明本文有关这一生态恢复工程对大气水循环的研究结果基本不受溯源模型和驱动数据的影响,具有一定的鲁棒性。

黄土高原上空大气在水平方向上表现为水汽通量净支出(净辐散),而纬向水汽通量的输入和输出均大于经向水汽通量的输入和输出,这主要与其纬向水汽通量存在明显的辐散有关。由于黄土高原处于青藏高原东北侧,而青藏高原海拔普遍超过 3 000 m 高度(相当于大气层 700 hPa 高度),因此越靠近青藏高原、大气中低层纬向风速越小,导致存在较明显的中低层纬向风辐散^[54]。而中低层由于水汽含量高使得其对整层水汽通量的数值影响最大,因此纬向风散度导致了纬向风水汽通量散度,是黄土高原净支出的主要原因^[55-56]。在热力条件不变的情况下,植被恢复后,黄土高原蒸发量显著增加,产生的额外水汽无法被大气柱完全储存。为了维持整层大气的水汽平衡,盈余水汽将通过平流向下游地区输出^[57]。与之相比,在垂直方向上,黄土高原水汽收支是净收入状态,即降水量大于蒸发量,而二者之间的盈余部分以径流形式输出到区域外以便维持区域水量平衡。

4 结论

本文基于 MERRA-2 数据和水汽溯源模型 DRM,分析了 1991 年至 2020 年间黄土高原生长季(4—9 月)降水量、蒸散发、水汽通量及其散度以及降水再循环率等大气水循环关键要素的时空变化特征。结果表明:由于植被恢复工程的实施,黄土高原降水量和蒸发量均呈现显著增加趋势,且降水增加速率大于蒸发增加速率,增加速率分别为 $2.67 \times 10^{-2} \text{ mm}/(\text{d} \cdot \text{a})$ 和 $1.87 \times 10^{-2} \text{ mm}/(\text{d} \cdot \text{a})$ 。近 30 年来,虽然外部源区和本地蒸散发对黄土高原生长季降水贡献量均呈显著增加趋势且外部平流水汽对降水的贡献仍占据主导地位,但退耕还林工程伴随的植被恢复使得蒸散发显著增强,导致黄土高原降水中源于本地的比例呈显著增加趋势($0.048 \text{ 3\%/a}$),而降水中源于外部平流的水汽供应比例减少。我们的研究表明,

在退耕还林工程的实施下,黄土高原植被恢复加速了黄土高原大气水循环,对当地降水和蒸发产生了强烈的影响,这对理解大规模的生态恢复工程对当地水文过程和气候系统的驱动机制具有重要意义。本文的研究结果可为深入理解黄土高原人地关系演变与保障区域水资源可持续利用提供科学参考。

参考文献

[1] Fan X L, Qu Y, Zhang J, et al. China's vegetation restoration programs accelerated vegetation greening on the Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 350: 109994.

[2] 赵津, 王坤, 严登华, 等. 2001—2022 年黄土高原植被时空变化分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2026, 24(3): 645-654, 747.

Zhao J, Wang K, Yan D H, et al. Spatial-temporal dynamics of vegetation in the Loess Plateau from 2001 to 2022[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2026, 24(3): 645-654, 747.

[3] 白芮华, 汪晓珍, 李继伟, 等. 1999—2020 年黄土高原地区县域尺度退耕还林(草)工程面积数据集[J]. *中国科学数据(中英文网络版)*, 2025, 10(4): 36-44.

Bai R H, Wang X Z, Li J W, et al. A dataset of county-scale "Grain for Green" Project areas on the Loess Plateau from 1999 to 2020[J]. *China Scientific Data*, 2025, 10(4): 36-44.

[4] Swann A L S, Fung I Y, Chiang J C H. Mid-latitude afforestation shifts general circulation and tropical precipitation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(3): 712-716.

[5] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.

[6] Bai P, Liu X M, Zhang Y Q, et al. Assessing the impacts of vegetation greenness change on evapotranspiration and water yield in China[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(10): e2019WR027019.

[7] Zhang B Q, Tian L, Yang Y T, et al. Revegetation does not decrease water yield in the Loess Plateau of China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(9): e2022GL098025.

[8] 吕美霞, 马柱国, 李明星. 气候变化、植被改变及人类用水与黄河流域水循环的研究进展[J]. *大气*

- 科学学报, 2023, 46(6): 801-812.
- Lê M X, Ma Z G, Li M X, et al. A review on the changing water cycle of the Yellow River basin under changes in climate, vegetation, and human water use [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2023, 46(6): 801-812.
- [9] Chen A J, Xiong J H, Wu S X, et al. Changes in terrestrial water storage in the Three-North region of China over 2003—2021: Assessing the roles of climate and vegetation restoration [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 637: 131303.
- [10] Wang Y Q, Hu W, Sun H, et al. Soil moisture decline in China's monsoon loess critical zone: More a result of land-use conversion than climate change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2024, 121(15): e2322127121.
- [11] Su C H, Fu B J. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes [J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 101: 119-128.
- [12] Ge L B, Mei X M, Ping J H, et al. Identification of suitable vegetation restoration areas and carrying capacity thresholds on the Loess Plateau [J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 373: 123660.
- [13] Tian L, Zhang B Q, Chen S Y, et al. Large-scale afforestation enhances precipitation by intensifying the atmospheric water cycle over the Chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, 127(16): e2022JD036738.
- [14] Qiu L J, Xue Q Y, Wu Y P, et al. Responses of precipitation and water vapor budget on the Chinese Loess Plateau to global land cover change forcing [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 365: 121588.
- [15] Qiu L J, Wu Y P, Shi Z Y, et al. Quantifying the responses of evapotranspiration and its components to vegetation restoration and climate change on the Loess Plateau of China [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13: 2358.
- [16] Zeng Z Z, Zhu Z C, Lian X, et al. Responses of land evapotranspiration to Earth's greening in CMIP5 Earth System Models [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(10): 104006.
- [17] Jin Z, Liang W, Yang Y T, et al. Separating vegetation greening and climate change controls on evapotranspiration trend over the Loess Plateau [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 8191.
- [18] Zhao F B, Ma S S, Wu Y P, et al. The role of climate change and vegetation greening on evapotranspiration variation in the Yellow River Basin, China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 316: 108842.
- [19] Luan J K, Miao P, Tian X Q, et al. Estimating hydrological consequences of vegetation greening [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 611: 128018.
- [20] Liu Y B, Xiao J F, Ju W M, et al. Recent trends in vegetation greenness in China significantly altered annual evapotranspiration and water yield [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(9): 094010.
- [21] 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 [J]. *科学通报*, 2019, 64(S1): 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 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(S1): 588-599.
- [22] 张耀宗, 张勃, 张多勇, 等. 1960—2018年黄土高原地区蒸发皿蒸发时空变化特征及影响因素 [J]. *干旱区研究*, 2022, 39(1): 1-9.
- Zhang Y Z, Zhang B, Zhang D Y, et al. Spatio-temporal patterns of pan evaporation from 1960 to 2018 over the Loess Plateau: Changing properties and possible causes [J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(1): 1-9.
- [23] Tan Q Y, Hua T, Zhao H C, et al. Vegetation greening and climate change respectively regulates the long-term trend and interannual variability in evapotranspiration over the Loess Plateau since the 21st century [J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2025, 13: 1513189.
- [24] Ge J, Pitman A J, Guo W D, et al. Impact of revegetation of the Loess Plateau of China on the regional growing season water balance [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(2): 515-533.
- [25] 谢丽君, 奥银焕, 李照国, 等. 陇东黄土高原不同农作物下垫面小气候与蒸散发特征观测分析 [J]. *高原气象*, 2023, 42(4): 899-912.
- Xie L J, Ao Y H, Li Z G, et al. Observation and analysis of microclimate and evapotranspiration characteristics of different crops underlying surfaces in the Loess Plateau in East of Gansu Province [J]. *Plateau Meteorology*, 2023, 42(4): 899-912.
- [26] Jiang F X, Xie X H, Wang Y B, et al. Vegetation greening intensified transpiration but constrained soil evaporation on the Loess Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 614: 128514.
- [27] Yang Z L, Bai P, Li Y Z. Quantifying the effect of

- vegetation greening on evapotranspiration and its components on the Loess Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 613: 128446.
- [28] Xin Z B, Yu X X, Li Q Y, et al. Spatiotemporal variation in rainfall erosivity on the Chinese Loess Plateau during the period 1956—2008[J]. *Regional Environmental Change*, 2011, 11(1): 149-159.
- [29] Liang X R, Yan J W, Liang W, et al. Ecosystem water limitation shifts driven by soil moisture in the Loess Plateau, China[J]. *Global and Planetary Change*, 2024, 243: 104625.
- [30] 刘玉鹏, 钞锦龙, 路亚敏, 等. 1959—2018年黄土高原地区降水时空变化研究[J]. *高原气象*, 2025, 44(3): 616-625.
- Liu Y P, Chao J L, Lu Y M, et al. Study on the spatio-temporal changes of precipitation in Loess Plateau from 1959 to 2018[J]. *Plateau Meteorology*, 2025, 44(3): 616-625.
- [31] Zhang X F, Yin Y H. Regional greening intensifies transpiration water consumption but enhances the positive feedback process between vegetation and precipitation[J]. *Journal of Hydrology*, 2026, 664: 134483.
- [32] 张宝庆, 田磊, 赵西宁, 等. 植被恢复对黄土高原局地降水的反馈效应研究[J]. *中国科学:地球科学*, 2021, 51(7): 1080-1091.
- Zhang B Q, Tian L, Zhao X N, et al. Feedbacks between vegetation restoration and local precipitation over the Loess Plateau in China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2021, 51(7): 1080-1091.
- [33] Shao R, Zhang B Q, He X G, et al. Historical water storage changes over China's Loess Plateau[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(3): e2020WR028661.
- [34] Sun S L, Liu Y B, Chen H S, et al. Causes for the increases in both evapotranspiration and water yield over vegetated mainland China during the last two decades[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 324: 109118.
- [35] Li Y, Piao S L, Li L Z X, et al. Divergent hydrological response to large-scale afforestation and vegetation greening in China[J]. *Science Advances*, 2018, 4(5): eaar4182.
- [36] Hu Q, Jiang D B, Lang X M, et al. Moisture sources of the Chinese Loess Plateau during 1979—2009[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 509: 156-163.
- [37] 卢珊, 胡泽勇, 付春伟, 等. 黄土高原夏季极端降水及其成因分析[J]. *高原气象*, 2022, 41(1): 241-254.
- Lu S, Hu Z Y, Fu C W, et al. Characteristics and possible causes for extreme precipitation in summer over the Loess Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2022, 41(1): 241-254.
- [38] Tuinenburg O A, Bosmans J H C, Staal A. The global potential of forest restoration for drought mitigation[J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(3): 034045.
- [39] Yan L B, Liu X D, Zhou Y. Variation in rainy season precipitation and associated water vapor transport over the Chinese Loess Plateau during 1961—2012[J]. *Climate Research*, 2013, 58(1): 43-53.
- [40] 杨镒如, 王斌, 李双双, 等. 秦巴山区夏季降水异常常年水汽输送特征分析[J]. *高原气象*, 2025, 44(2): 421-434.
- Yang Y R, Wang B, Li S S, et al. Summer water vapor transport and sources in anomalous precipitation years over the Qinba Mountains[J]. *Plateau Meteorology*, 2025, 44(2): 421-434.
- [41] Dominguez F, Kumar P, Liang X Z, et al. Impact of atmospheric moisture storage on precipitation recycling[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19: 1513-1530.
- [42] Martinez J A, Dominguez F. Sources of atmospheric moisture for the La Plata River Basin[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(17): 6737-6753.
- [43] Gelaro R, McCarty W, Suárez M J, et al. The Modern-era retrospective analysis for research and applications, Version 2 (MERRA-2)[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(14): 5419-5454.
- [44] 张捷, 张小龙, 陈泊舟, 等. 基于数据挖掘的气象三要素空间一致性检验方法[J]. *气象科技进展*, 2023, 13(2): 44-48, 57.
- Zhang J, Zhang X L, Chen B H, et al. The spatial consistency test method for the three elements of meteorology based on data mining[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2023, 13(2): 44-48, 57.
- [45] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13: 245-259.
- [46] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. *British Journal of Psychology*, 1990, 25(1): 86-91.
- [47] 苏涛, 封国林. 基于不同再分析资料的全球蒸发量时空变化特征分析[J]. *中国科学:地球科学*, 2015, 45(3): 351-365.
- Su T, Feng G L. Spatial-temporal variation characteristics of global evaporation revealed by eight reanalyses[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2015, 58: 255-

- 269.
- [48] 张含玉, 方怒放, 史志华. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(13): 3960-3968.
- Zhang H Y, Fang N F, Shi Z H. Spatio temporal patterns for the NDVI and its responses to climatic factors in the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(13): 3960-3968
- [49] Liu T S, Ding Z L. Chinese loess and the paleomonsoon[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1998, 26(1): 111-145.
- [50] Ding Y H, Chan J C L. The East Asian summer monsoon: An overview [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2005, 89(1/2/34): 117-142.
- [51] 黄伟, 陈建徽, 张肖剑, 等. 现代气候条件下降水变化的“西风模态”空间范围及其影响因子初探[J]. 中国科学:地球科学, 2015, 45(4): 379-388.
- Huang W, Chen J H, Zhang X J, et al. Definition of the core zone of the "westerlies-dominated climatic regime", and its controlling factors during the instrumental period [J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 45(4): 379-388.
- [52] Su T, Feng T C, Feng G L. Evaporation variability under climate warming in five reanalyses and its association with pan evaporation over China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(16): 8080-8098.
- [53] Cao M Z, Wang W G, Wei J, et al. Revegetation impacts on moisture recycling and precipitation trends in the Chinese Loess Plateau[J]. Water Resources Research, 2024, 60(12): e2024WR038199.
- [54] 段玮, 段旭, 樊风, 等. 青藏高原东南侧干湿季气候特征与成因[J]. 干旱气象, 2015, 33(4): 546-554.
- Duan W, Duan X, Fan F, et al. Climatic characteristics of dry and wet season in the southeast side of the Tibetan Plateau and its causes [J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(4): 546-554.
- [55] 朱丽华, 范广洲, 周定文. 高原夏季西风异常年500hPa 纬向风季节内振荡特征及其与我国降水的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(10): 1254-1261.
- Zhu L H, Fan G Z, Zhou D W, et al. Intraseasonal oscillation of 500 hPa zonal wind in the abnormal years of the westerly wind in summer over the Tibetan Plateau and its relationship to the precipitation in China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(10): 1254-1261.
- [56] 王珺雨, 陈丹. 青藏高原夏季高层纬向风季节内振荡特征[J]. 大气科学学报, 2023, 46(1): 152-160.
- Wang J Y, Chen D. Intraseasonal oscillation characteristics of zonal wind at upper troposphere over Tibetan Plateau in summer [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2012, 21(10): 1254-1261.
- [57] Wallace J M, Hobbs P V. Atmospheric Science [M]. New York: Academic Press, 2006:271.

(编辑 邵煜)