

黄土高原退耕还林(草)以来植被水分利用效率的时空特征及预测

邵蕊, 李垚, 张宝庆*

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

摘要 水分利用效率(WUE)是评估生态系统水碳循环的重要指标。基于PT-JPL模型的区域尺度实际蒸散发(ET)的模拟结果,结合黄土高原的总初级生产力(GPP),分析了退耕还林(草)工程实施后黄土高原水分利用效率WUE的时空变化趋势,结合CMIP6对未来3种情景下黄土高原的ET、GPP和WUE进行了预测。结果表明:2001—2015年,黄土高原植被显著增加,GPP和ET分别以每年 $3.59 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 4.39 mm 的速率增加。WUE在72.68%的地区呈增加趋势,区域增长率为 $0.003 \text{ g C} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。在2015—2100年的3种情景中,ET均呈增加趋势,而GPP和WUE在SSP126中变化不大,在SSP245、SSP370情景中显著增加,WUE随着GPP的增加而增加。WUE结合了水资源的“消耗”和“利用”来阐明退耕还林(草)工程的成效,植被恢复虽然增加了区域耗水量,但是显著改善了植被覆盖情况,有效地提高了植被的固碳能力和水分利用效率,整个黄土高原植被的抗旱能力在增强。未来需进一步分析不同树种的WUE,筛选出抗旱性更高的树种进行植被恢复工作。

关键词 黄土高原;水分利用效率;退耕还林(草)工程;植被恢复;时空分布

地球上的水圈,大气圈及生物圈之间在永不停息地进行着物质和能量的循环和交换。生态系统中水碳循环密不可分,没有水碳循环的推动,生态系统很难维持现有的各项功能。水碳耦合关系在生态系统中的重要性其中一部分体现在水和植被间的相互作用^[1-3],水直接影响着植被的生长^[4-7],植

被变化也会通过改变地表特征对地表水平衡及能源收支产生直接或间接的影响,这可能会加剧干旱半干旱地区的缺水态势,进一步导致更紧张的水资源供需平衡关系^[8-9]。全球干旱半干旱地区分布广泛,生态极其脆弱,对水碳耦合的评估早已刻不容缓,加之干旱半干旱地区本来就对气候变化和人类

收稿日期:2020-05-06;修回日期:2020-07-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0403600);国家自然科学基金项目(41877150,51609111,41530752)

作者简介:邵蕊,硕士研究生,研究方向为大规模植被恢复蒸散耗水规律,电子信箱:shaor13@lzu.edu.cn;张宝庆(通信作者),教授,研究方向为干旱模拟预报、大规模植被恢复蒸散耗水规律、雨水资源高效利用,电子信箱:baozhang@lzu.edu.cn

引用格式:邵蕊,李垚,张宝庆.黄土高原退耕还林(草)以来植被水分利用效率的时空特征及预测[J].科技导报,2020,38(17):81-91;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2020.17.008

活动高度敏感,再进行植被恢复,对水碳耦合的影响已成为了一个亟需研究解决的问题^[7,10-11]。

黄土高原位于黄河中上游,具有大陆气候特征,属于典型的干旱半干旱地区。人类长期不合理地利用土地,破坏了原本的水碳循环平衡,加之黄土高原土质疏松,使其生态系统长期处于不稳定状态,暴雨冲刷强烈,水土流失严重,成为了世界上缺水严重、生态脆弱的地区之一^[9,12-13]。长期的水土流失和干旱缺水制约了黄土高原农业和生态的发展,中国自1999年启动了退耕还林(草)工程^[14],旨在修复黄土高原生态,有效控制水土流失。在过去的20年间,黄土高原的植被覆盖度剧烈增加,生态恢复效果显著^[15-18]。然而,新的生态问题随着植被的剧烈增加而凸显,比如土壤干化及植被退化等^[19]。并且,近年来黄土高原气候变暖趋势显著,气温发生明显的增加,近40年气温上升了1.32℃。在气候变暖的大背景下,水资源消耗量不断增加,应当权衡生态环境“固碳”与“耗水”之间的关系,进一步评估植被恢复后的生态效果,结合生态环境和水资源从深层次分析政策实施对黄土高原生态的影响,这不仅紧密联系着黄土高原退耕还林(草)工程的可持续性,而且关乎黄土高原生态农业与经济建设的长足发展。然而,植被变化引起区域水碳循环的变化及预测存在着高度的不确定性,阻碍了植被恢复的评估及预测的发展,因此评估区域水碳耦合关系对生态系统的研究具有重要意义。

总初级生产力(GPP)在生态系统的水碳平衡中扮演着重要角色,是碳储量的体现,蒸散发(ET)是水资源消耗的过程。水分利用效率(WUE)的研究作为农业和植物生理领域的一个热点问题受到了广泛的关注,其结合了生态系统中的水和碳两个过程,指的是植物消耗单位质量的水所固定CO₂(或生成干物质)的量,能够反映生态系统对水资源变化的响应^[20-22]。在黄土高原植被剧烈变化的背景下,水碳循环及相互作用发生了巨大的改变,因此探讨WUE的动态变化对于研究黄土高原水碳耦合关系具有重要意义^[23]。

国内外学者已经对WUE的研究开展了大量工作,不同地区的水分利用效率变化不同,区域尺度

上的WUE存在巨大的空间变异性^[24]。现有的黄土高原水分利用效率的研究大多涉及单一植被类型的测量或观测,而不是使用遥感数据的综合研究,不足以对整个植被的恢复进行评价及预测,所得结论难以将理论推广到整个黄土高原进行探究。并且,黄土高原地区可利用水下降会导致频繁干旱、洪水和土壤侵蚀,这些因素一起会使当地环境更加恶劣。已有研究表明中国最主要的造林工程集中在水分利用效率低值区域和固碳消耗水高值区域,这些区域的降雨都是在400~500 mm等值线边界,属于干旱和半干旱区域,植被恢复工程中存在潜在的危险,在植被恢复剧烈的区域研究WUE的变化尤为重要^[25]。因此,迫切需要更深入地了解这些生态恢复计划是如何改变水和碳平衡的。本研究基于植被动态PT-JPL模型区域尺度的蒸散发模拟结果,结合总初级生产力数据,分析退耕还林(草)工程实施后黄土高原水分利用效率的时空变化趋势,并基于CMIP6对未来3种情景下黄土高原的ET、GPP和WUE进行预测分析。

1 研究区、资料与方法

1.1 研究区

黄土高原坐落于黄河中上游地区,地处33°43'N~41°16'N, 100°54'E~114°33'E。平均海拔1000~1500 m,总面积约为640000 km²(图1)^[9,25-26]。黄土高原的多年平均气温约为9~12℃,总降水量少,降水的时空分布不均匀,东南多西北少,且多集中在夏季。黄土高原以黄河为骨干的河流有200余条,但总体径流量偏少,河流受汛期影响严重^[27-28],16个流域的分布情况见图1。黄土高原因长期以来的植被缺乏和独特的土壤条件,致使生态脆弱,水土流失严重,加之人类长期不合理地开垦和利用土地,加剧了黄土高原的生态问题^[29]。自退耕还林(草)工程实施以来,大量坡耕地转换为林地和草地,植被覆盖度提高了25%。图2是黄土高原退耕还林(草)前后的植被情况对比图,植被密度明显增加,植被恢复效果突出。

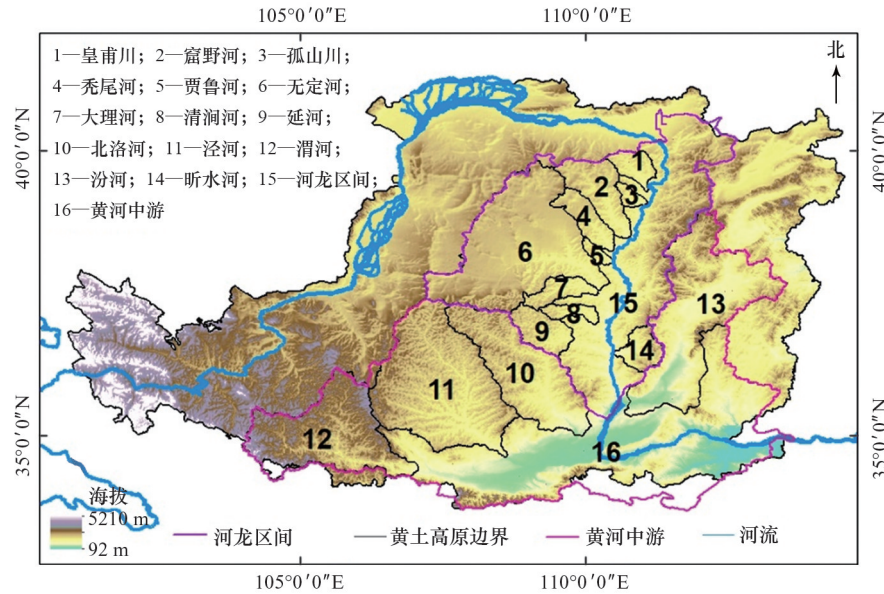
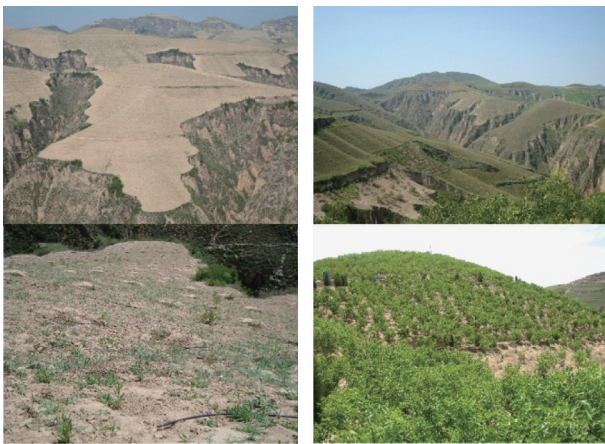


图1 黄土高原地貌



(a) 退耕还林(草)前

(b) 退耕还林(草)后

图2 黄土高原实施退耕还林(草)前和后的植被状况的比较

1.2 资料

研究所用的实际蒸散发数据来源于文献[30], 基于PT-JPL模型估算的全中国范围的实测蒸散发结果, 空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$, 时间长度为2001—2015年。模型中引入了植被动态, 并在不同植被类型中进行了模型参数优化, 基于中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)通量站观测的蒸散发数据^[31]和4个实测站点^[32-33]的数据验证了优化后的PT-JPL模型在区域上不同土地覆盖中的模拟性能, 在黄土高原模拟效果良好。

利用MODIS GPP产品和PT-JPL模型模拟的

ET计算了黄土高原的WUE, GPP数据的空间分辨率为500 m, 时间分辨率为8 d。

基于参数优化后的PT-JPL模型对黄土高原2015—2100年期间的ET和WUE进行预测, 使用了耦合模型比较项目第六阶段(CMIP6^[34], <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/>)的3个模式(BCC-CSM2-MR、CanESM5、MRI-ESM2-0)的气候强迫数据和GPP数据。

1.3 方法

利用MRT(MODIS Reprojection Tool)将MODIS产品原始的投影转换为UTM-WGS84投影, 然后利用ARCGIS根据黄土高原的范围, 对MODIS产品进行裁剪, 再采用距离平方加权法将这些数据重采样为空间分辨率 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ ^[35]。

WUE计算公式为^[34]

$$WUE = GPP/ET \quad (1)$$

式中: WUE为水分利用效率, $g C \cdot mm^{-1} \cdot m^{-2}$; GPP为总初级生产力, $g C \cdot m^{-2}$; ET为实际蒸散发, mm。

通过Mann-Kendall突变检验和趋势检验方法分析2001—2015年黄土高原LAI和ET的变化情况^[36-38]。MK检验中的统计量S用于检验水文或气象序列的趋势, 定义如下:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{i=k+1}^n \text{sign}(x_i - x_k) \quad (2)$$

$$\text{sign}(x_i - x_k) = \begin{cases} +1, & x_i - x_k > 0 \\ 0, & x_i - x_k = 0 \\ -1, & x_i - x_k < 0 \end{cases} \quad (3)$$

趋势的显著性是通过统计量 Z 计算

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{var } S}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{var } S}}, & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\text{var } S$ 是 S 的方差; $Z > 0$ 代表该序列呈增加趋势; $Z < 0$ 代表该序列呈下降趋势。 $|Z| \geq 1.96$ 和 $|Z| \geq 2.58$ 分别代表通过了 95% 和 99% 的显著性水平。

设 (x_1, x_2, \dots, x_n) 是时间序列并且 $x_i > x_j$ ($1 < j < i$)。 d_k 定义如下:

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i, \quad 2 \leq k \leq n \quad (5)$$

d_k 的均值及方差可以表示为

$$E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (6)$$

$$\text{var } d_k = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}, \quad 2 \leq k \leq n \quad (7)$$

在时间序列是随机且独立的假设下, 统计定义如下:

$$UF_k = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{\text{var } d_k}}, \quad 2 \leq k \leq n \quad (8)$$

假设 $UF_1 = 0$, 所有 $E(d_k)$ 将产生曲线 UF 。将时间序列 x 逆序, 然后就能得到 UB_k 序列。

$$\begin{cases} UB_k = -UF_{k'} \\ k' = n + 1 - k \end{cases} \quad (9)$$

UF 和 UB 在置信线之间的交点表示发生突变的时间。在 $\alpha=0.05$ 的显著水平下, $UF_k > 0$ 表示序列增加, $UF_k < 0$ 表示序列减小。 $UF_k > 1.96$ 和 < -1.96 分别表示显著的上升和下降趋势。

采用一元线性回归分析方法分析 2001—2015 年黄土高原 GPP 和 WUE 的变化趋势以及 2015—2100 年 ET、GPP 和 WUE 的变化趋势, 多元回归方程趋势线的斜率即表示多年变化趋势。公式如下:

$$\text{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n i x_i - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (10)$$

式中, slope 表示变量的变化趋势; n 是时间序列的长度。

2 结果与分析

2.1 黄土高原 2001—2015 年 LAI 及 GPP 的变化

图 3 是黄土高原退耕还林(草)工程实施以来(2001—2015 年)的叶面积指数(LAI)的变化情况。图 3(a) 是黄土高原 LAI 在空间上的 MK 趋势检验图, 大于 1.96 代表显著增加, 小于 -1.96 代表显著降低。结果表明, 黄土高原的中部、东部及南部地区的 LAI 增加显著, 通过了 95% 的显著性水平, 而西北部干旱半干旱地区的 LAI 呈下降趋势。东南部的植被类型多为针阔叶林和寒温性灌丛, 同时也是退耕还林(草)工程开展的核心地区; 西北部的土地利用类型为荒漠、沙地及裸岩, 东南部暖湿气流难以到达西北部, 因此 LAI 呈降低的趋势。图 3(b) 是黄土高原区域平均 LAI 的年际变化, 2001—2015 年, 区域平均的年 LAI 从 $0.55 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ 增加到了 $0.81 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, 年平均增长率为 $0.017 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。图 3(c) 为 MK 检验图, 结果表明 LAI 在 2001—2015 年期间增加, 在 2004 年后显著增加。综上所述, 黄土高原在退耕还林(草)工程实施后, 地表植被不断增加, 中部和东部地区的增加尤为剧烈。

在黄土高原地表植被增加的情景下, GPP 也会发生变化。图 4(a) 是黄土高原的多年平均 GPP 的空间分布图, GPP 的分布显示出了明显的空间变异性, 从黄土高原东南部向西北部递减, 东南部的 GPP 在 $400 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上, 西北部在 $100 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下。图 4(b) 是黄土高原 2001—2015 年的 GPP 的变化趋势的区域分布图, 可以发现, 在黄土高原中部地区, GPP 剧烈增加, 93% 的区域上 GPP 在 2001—2015 年处于增加趋势, 只有在东部和南部的少部

分区域 GPP 是降低的。GPP 显著增加的地区也对应着植被恢复工程取得较大成效的地区(例如清涧河流域), 大部分地区 GPP 在增加, 说明黄土高原的植被重建已经取得了一定的成效。图 4(c) 是黄土高原区域平均 GPP 的年际变化, GPP 在 2001—2015 年

以 $3.59 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速度增加, 2001 年最小, 为 $185.70 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}$, 2012 年 GPP 达到最大值, 为 $305.67 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}$ 。综合来看, 退耕还林工程实施后, 黄土高原的地表植被恢复明显, GPP 也在不断增加。

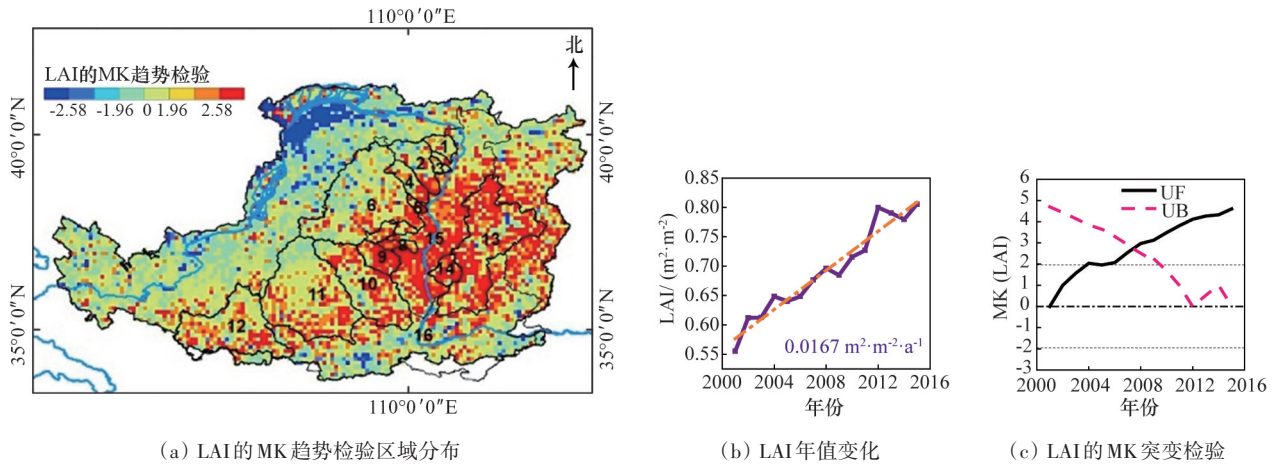
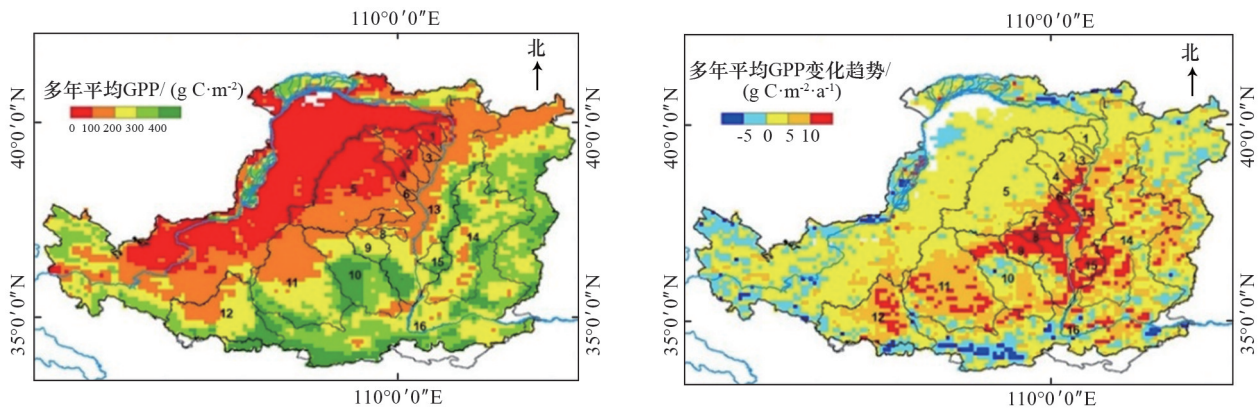
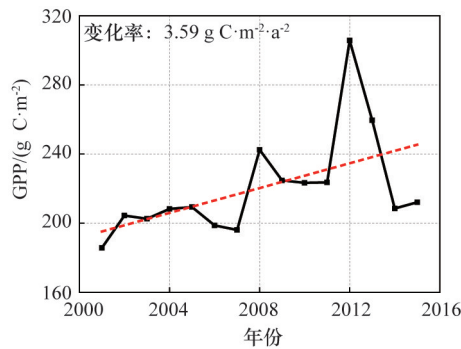


图 3 2001—2015 年, 黄土高原 LAI 的变化趋势



(a) 黄土高原多年平均 GPP 的空间分布图

(b) 黄土高原 2001—2015 年的 GPP 的变化趋势的区域分布图



(c) 黄土高原区域平均 GPP 的年际变化

图 4 2001—2015 年黄土高原 GPP 的分布及变化情况

2.2 黄土高原2001—2015年的ET的变化

采用优化参数后的PT-JPL模型在区域尺度上模拟了黄土高原2001—2015年的实际蒸散发(模型的优化过程、验证及适用性评估参见文献[30])。图5是黄土高原实际ET在研究期内的变化情况,图5(a)是ET的MK趋势检验的空间分布图,在整个黄土高原,有86%的地区ET呈增加趋势,在中部、东部和南部的部分地区,ET显著增加,在西北

部的部分地区ET下降,ET显著增加的地区与LAI大体一致。图5(b)是区域平均ET的年均值,结果表明ET在15年间呈增加趋势,平均每年增加4.39 mm,整个研究期内共增加了66 mm。图5(c)是ET的MK检验图,结果显示黄土高原的实际ET在2001—2015年期间几乎是持续增加的($UF > 0$)。整个区域上ET的大规模增加会对水碳耦合产生一定的影响。

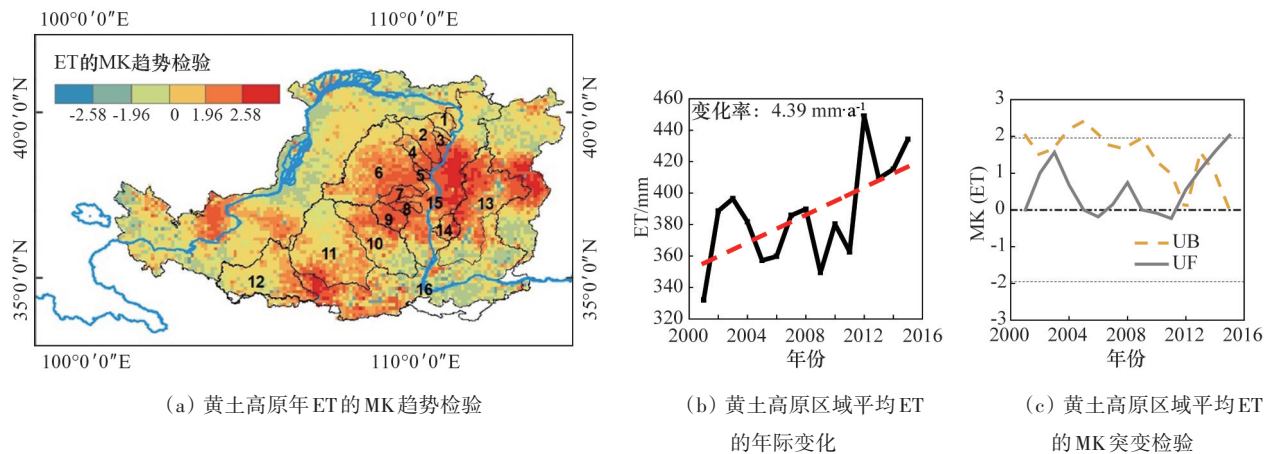


图5 基于PT-JPL模型计算的2001—2015年黄土高原实际ET的分布及趋势

2.3 黄土高原退耕还林(草)后WUE变化

植被水分利用效率(WUE)是衡量生态系统水-碳循环程度的重要指标^[39],黄土高原的GPP在增加,水分消耗量也在增加,WUE的变化情况难以判定,估算黄土高原的WUE并分析其时空变化规律,对该区域的生态修复评价、水资源的合理利用等方面具有重要的意义。

图6是黄土高原2001—2015年多年平均植被WUE的空间分布图,从图6中可以看出,WUE呈现明显的空间分异特征,从东南向西北递减,黄土高原东南部可达 $0.7 \text{ g C} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上,主要以耕地和林地为主,属于植被GPP、ET的高值区,也属于WUE的高值区。西北部的河套平原的WUE也较高,而西北部其余地区较低,在 $0.4 \text{ g C} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下,以草原、稀疏灌丛和荒漠为主,其GPP与ET值均属于较低的水平,因此WUE也较低。空间分异特征主要是由于不同生态系统间的耗水功能差异和光合作用效率差异引起的。

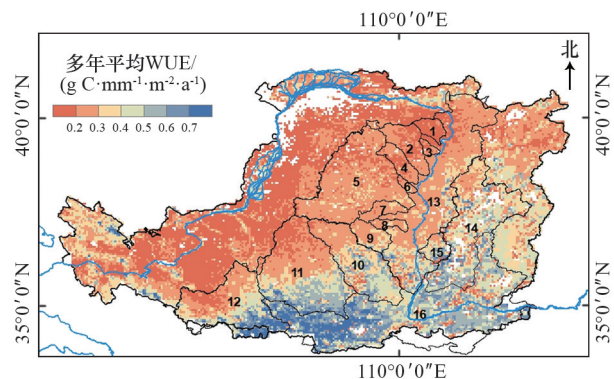


图6 黄土高原多年平均植被WUE的空间分布图

图7(a)是黄土高原2001—2015年的WUE的变化趋势的区域分布图,整个区域上WUE变化趋势在 $-0.23 \sim 0.2 \text{ g C} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间。WUE呈增加趋势的地区占整个黄土高原的72.68%,增加的区域主要分布在黄土高原南部和中部,下降的区域主要分布在黄土高原的西北部。进一步分析了黄土高原植被WUE的年均变化(图7(b)),WUE的年均变化范围为 $0.51 \sim 0.68 \text{ g C} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,多年均值

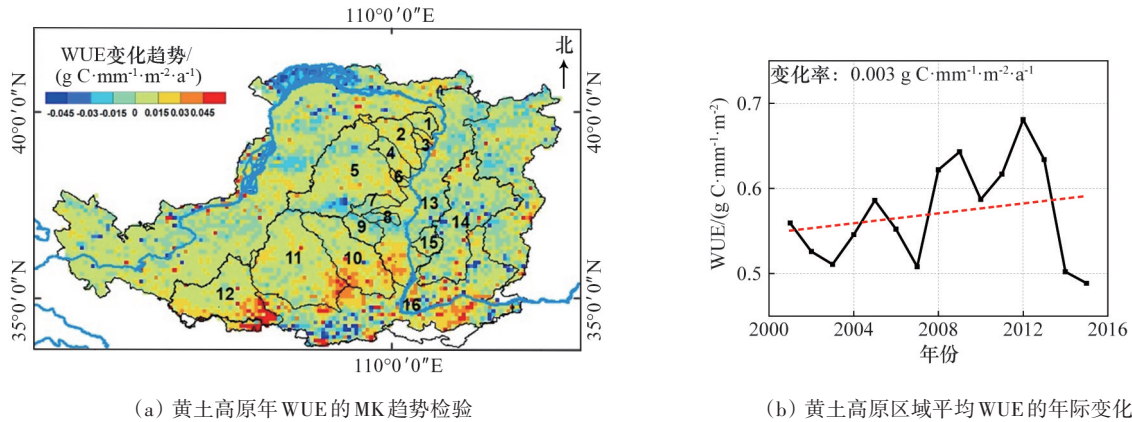


图7 黄土高原2001—2015年的WUE的变化趋势的区域分布图及区域平均WUE的年际变化

为 $0.57 \text{ g C} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, 整体呈上升趋势, 平均每年增加 $0.003 \text{ g C} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2.4 黄土高原 2015—2100 年 ET、GPP 和 WUE 的预测

为了对未来黄土高原的水资源管理提供参考并对水碳耦合进行评估, 预测了未来黄土高原的 WUE 变化情况。选取了 CMIP6 的数据作为 PT-JPL 模型的输入, 通过双线性插值的方法将 CMIP6 的数据空间分辨率处理至为 $1.125^\circ \times 1.125^\circ$, 在未来共享社会经济路径 SSP 126、SSP245、SSP370 这 3 种不同的情景下, 模拟了 2015—2100 年黄土高原 ET 的变化, 并结合 GPP 计算了未来 3 种排放情景下的黄土高原植被水分利用效率 WUE 的变化。图 8~图 10 显示了 2015—2100 年的 ET、GPP 和 WUE 的变化, 在 SSP126 情景中, ET 以每年 0.46 mm 的速度增加, 而 GPP 基本保持不变, WUE 轻微下降。在

SSP245 情景中, ET 的增长率为 $0.78 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, GPP 较 SSP126 的增加更多, 增长率为 $4.57 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, WUE 与 GPP 成正比, 因此 WUE 也显著增加, 平均每年增加 $0.0062 \text{ g C} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在 SSP370 情景中, ET 的变化与 SSP245 相差不大, 而 GPP 增加得更为剧烈, 增长率为 $7.10 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, WUE 也随着 GPP 的剧烈增加而增加, 增长率为 $0.011 \text{ g C} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。对比 3 种情景, 从温室气体低排放到高排放情景, ET 的变化并不剧烈, 而 GPP 与碳息息相关, 因此 GPP 随着碳排放的增加发生了剧增。此外, WUE 与 GPP 成正比, GPP 显著增加的同时, 对 WUE 也产生了巨大的影响。整体看来, 未来 3 种情景中黄土高原的 ET 虽然都在增加, 但 GPP 的剧烈增加是影响 WUE 增加的主要原因。预测未来黄土高原水分利用效率的变化可以为未来的植被恢复策略以及水资源管理提供合理的参考。

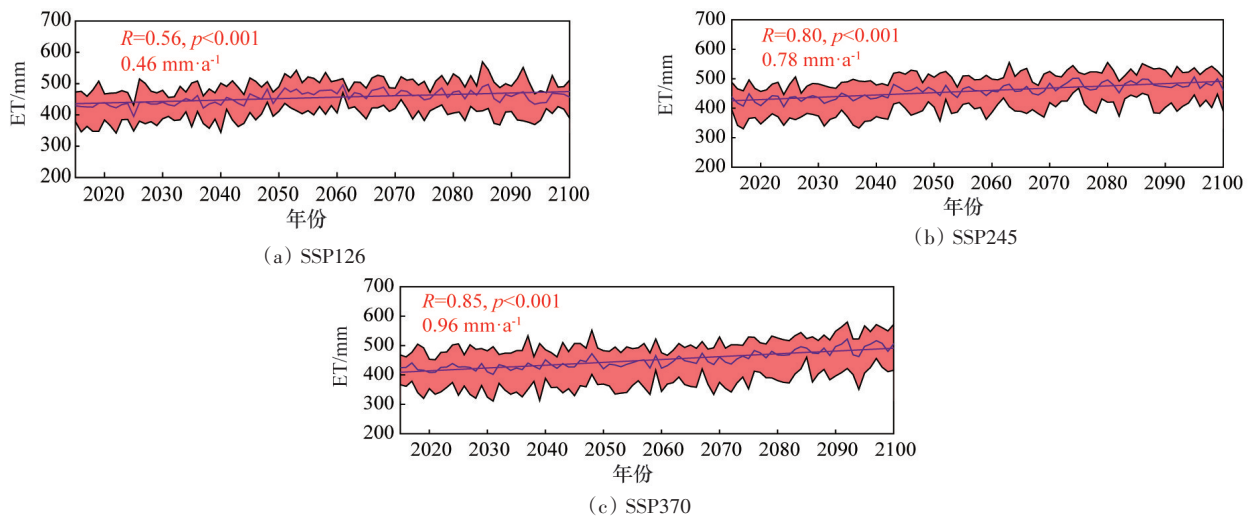


图8 基于 CMIP6 预测的未来 3 种情景的黄土高原 2015—2100 年 ET 的变化趋势

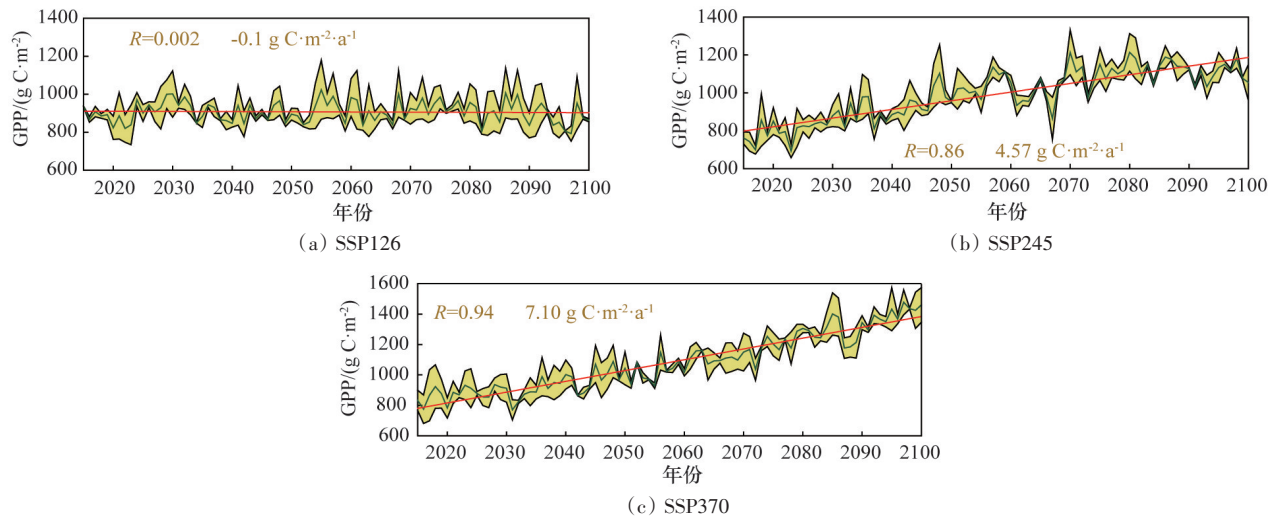


图9 基于CMIP6预测的未来3种情景的黄土高原2015—2100年GPP的变化趋势

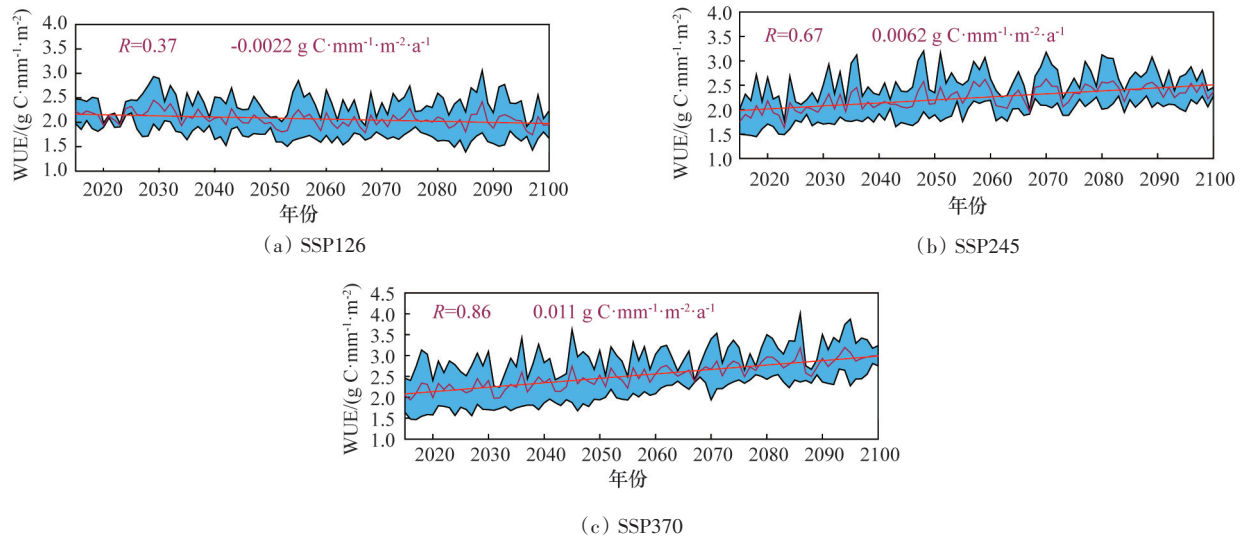


图10 基于CMIP6预测的未来3种情景的黄土高原2015—2100年WUE的变化趋势

3 结论

基于优化后的PT-JPL模型在黄土高原区域尺度上模拟的ET,结合了MODIS GPP分析了退耕还林(草)工程实施后黄土高原WUE的情况,结果表明黄土高原的WUE空间分布为东南多西北少,是由于不同生态系统间的耗水功能差异和光合作用效率差异引起的。当黄土高原2001—2015年植被显著增加的同时,GPP和ET均呈增加趋势,分别以 $3.59 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $4.39 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速率增加,WUE也随之增加,增长率为 $0.003 \text{ g C}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。GPP是影响WUE变化的因素之一,两者的变化呈

现相似性。WUE在72.68%的地区是增加的,年均变化范围是 $0.51\sim 0.68 \text{ g C}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 。在2001—2015年黄土高原的WUE呈现增加是因为植被恢复使得生态环境得到了改善,部分人工林从幼林逐渐成熟,固碳能力不断增强。

进一步基于PT-JPL模型和CMIP6预测了未来三种情景黄土高原的ET,结合2015—2100年的GPP计算了WUE,预测结果表明:在SSP126情景中,ET以 $0.46 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速度增加,而GPP基本保持不变,WUE轻微下降。在SSP245情景中,ET以 $0.78 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速度增加,GPP较SSP126剧烈增加,增长率为 $4.57 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,WUE增长率为 0.0062

$\text{g C}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。在 SSP370 情景中, ET 的变化与 SSP245 相差不大, GPP 的增加更加剧烈, 增长率为 $7.10 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, WUE 也随着 GPP 的剧烈增加而增加。未来 3 种情景中黄土高原的 ET 虽然都在增加, 但 GPP 和 WUE 随着碳排放量的增加而增加, CO_2 浓度上升带来的施肥效应是生态系统生产力增加驱动因子, 同时也会对 WUE 的变化产生显著影响。黄土高原未来耗水量在增加, 但是植被对水分的利用率也在增加, 在消耗水量的同时会固定更多的碳。

在退耕还林(草)以来, 大规模的植被恢复导致黄土高原的水文特征及碳水耦合关系发生了改变, 并反馈到了生态系统中。但是经过综合考虑水资源的“消耗”与“利用”后发现, 植被恢复工程显著改善了植被覆盖情况, 有效地提高了植被的水分利用效率。这说明退耕还林(草)工程虽然增加了区域耗水量, 但是也增强了水碳耦合效率, 负面效应有所降低。未来应进一步研究 WUE 以筛选在相同气候条件下更为抗旱的树种, 用于黄土高原的造林决策, 并逐步探索“固碳”-“耗水”之间的关系, 以应对可能产生的水资源或生态问题。全区域的生态建设和水资源保护是一个永恒的话题, 在当前气候背景下, 保障水碳循环的健康发展, 是黄土高原经济建设与生态文明协同发展的重要保障。

参考文献(References)

- [1] Troch P A, Martinez G F, Pauwels V R N, et al. Climate and vegetation water use efficiency at catchment scales [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(16): 2409–2414.
- [2] Zhang S, Yang Y, Mcvigar T R, et al. An analytical solution for the impact of vegetation changes on hydrological partitioning within the budyko framework[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(1): 519–537.
- [3] Jacobs J M. Ecohydrology: Darwinian expression of vegetation form and function[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2004, 84(35): 345–345.
- [4] Anderson M C, Norman J M, Mecikalski J R, et al. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing. 1. Model formulation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: D11112.
- [5] Gao X, Zhao X, Li H, et al. Exotic shrub species (*Caragana korshinskii*) is more resistant to extreme natural drought than native species (*Artemisia gmelinii*) in a semiarid revegetated ecosystem[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 263: 207–216.
- [6] Zhang B, Long B, Wu Z, et al. An evaluation of the performance and the contribution of different modified water demand estimates in drought modeling over water-stressed regions[J]. *Land Degradation Development*, 2017, 28(3): 1134–1151.
- [7] 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[J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 569–570: 1032–1039.
- [8] Su C, Fu B. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use change [J]. *Global Planetary Change*, 2013, 101: 119–128.
- [9] Wang Y, Shao M, Zhu Y, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(4): 437–448.
- [10] Zhang B, Aghakouchak A, Yang Y, et al. A water-energy balance approach for multi-category drought assessment across globally diverse hydrological basins[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 264: 247–265.
- [11] Yang Z, Zhang Q, Yang Y, et al. Evaluation of evapotranspiration models over semi-arid and semi-humid areas of China[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(23): 4292–4313.
- [12] Han X, Tsunekawa A, Tsubo M, et al. Effects of land-cover type and topography on soil organic carbon storage on Northern Loess Plateau, China[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Plant Soil Science*, 2010, 60(4): 326–334.
- [13] Zhang B, He C, Burnham M, et al. Evaluating the coupling effects of climate aridity and vegetation restoration on soil erosion over the Loess Plateau in China[J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 539: 436–449.
- [14] 焦峰, 温仲明, 李锐. 黄土高原退耕还林(草)环境效应分析[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(1): 26–29.
- [15] Feng X, Fu B, Piao S, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019–

- 1022.
- [16] Wang S, Fu B, Gao G Y, et al. Soil moisture and evapotranspiration of different land cover types in the Loess Plateau, China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(8): 2883–2892.
- [17] Chen Y, Wang K, Lin Y, et al. Balancing green and grain trade[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 739–741.
- [18] Qiu L, Wu Y, Wang L, et al. Spatiotemporal response of the water cycle to land use conversions in a typical hilly-gully basin on the Loess Plateau, China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2017, 21(12): 1–30.
- [19] Zhang B, Wu P, ZhaO X, et al. Assessing the spatial and temporal variation of the rainwater harvesting potential (1971–2010) on the Chinese Loess Plateau using the VIC model[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(3): 534–544.
- [20] 胡中民, 于贵瑞, 王秋凤, 等. 生态系统水分利用效率研究进展[J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 448–457.
- [21] 王庆伟, 于大炮, 代力民, 等. 全球气候变化下植物水分利用效率研究进展[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 259–269.
- [22] Gang C, Wang Z, Chen Y, et al. Drought-induced dynamics of carbon and water use efficiency of global grasslands from 2000 to 2011[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 788–797.
- [23] 张远东, 庞瑞, 顾峰雪, 等. 西南高山地区水分利用效率时空动态及其对气候变化的响应 [J]. *生态学报*, 2016, 36(6): 1515–1525.
- [24] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏, 等. 黄河中游气温变化趋势及其对蒸发能力的影响[J]. *水资源与水工程学报*, 2007, 18(4): 36–40.
- [25] 张宝庆, 吴普特, 赵西宁, 等. 黄土高原雨水资源化潜力与时空分布特征[J]. *排灌机械工程学报*, 2013, 31(7): 89–97.
- [26] 高晓东, 吴普特, 赵西宁, 等. 黄土丘陵区沟道小流域土壤有效储水量估算[J]. *水利学报*, 2013(6): 108–116.
- [27] Feng X, Wang Y, Chen L, et al. Modeling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau[J]. *Geomorphology*, 2010, 118(3–4): 239–248.
- [28] 姜永清, 邵明安, 李占斌, 等. 黄土高原流域水系的 HORTON 级比数和分形特性[J]. *山地学报*, 2002, 20(2): 206–211.
- [29] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原侵蚀产沙强度的时空变化特征[J]. *地理学报*, 2002, 57(2): 210–217.
- [30] Shao R, Zhang B, Su T, et al. Estimating the increase in regional evaporative water consumption as a result of vegetation restoration over the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2019, doi: 10.1029/2019JD031295.
- [31] Liu S, Xu Z, Wang W, et al. A comparison of eddy-covariance and large aperture scintillometer measurements with respect to the energy balance closure problem[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(4): 1291–1306.
- [32] 袁小环, 杨学军, 陈超, 等. 基于蒸渗仪实测的参考作物蒸散发模型北京地区适用性评价 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(13): 104–110.
- [33] 张秀平, 许小华, 雷声, 等. 基于遥感技术的鄱阳湖湿地蒸散发估算研究[J]. *人民长江*, 2014, 45(1): 28–31.
- [34] Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al. Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization[J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 9(5): 1937–1958.
- [35] New M, Hulme M, Jones P. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: Development of a 1961–90 mean monthly terrestrial climatology[J]. *Journal of Climate*, 2000, 12(3): 829–856.
- [36] Goossens C, Berger A. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century[J]. *Annales Geophysicae*, 1986, 4(4): 385–400.
- [37] Mann H B. Non-parametric test against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245–259.
- [38] 叶磊, 周建中, 曾小凡, 等. 水文多变量趋势分析的应用研究[J]. *水文*, 2014(6): 33–39.
- [39] 艾则孜提约麦尔·麦麦提, 玉素甫江·如素力, 何辉, 等. 2000—2017年新疆天山植被水分利用效率时空特征及其与气候因子关系分析[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(6): 490–500.

Analysis of the spatial and temporal analysis and prediction of water use efficiency since the Grain for Green Project in the Loess Plateau

SHAO Rui, LI Yao, ZHANG Baoqing*

Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract Since the Grain for Green Project was launched in the Loess Plateau in 1999, the vegetation restoration effect has been significant. However, a high degree uncertainty in changes and predictions of regional water and carbon cycles caused by vegetation changes hinders the development of vegetation restoration assessment and prediction. Water use efficiency (WUE) is an important indicator for assessing the water-carbon cycle in ecosystems. Based on the simulation results of regional scale actual evapotranspiration (ET) by the PT-JPL model, combined with the GPP of the Loess Plateau, this paper analyzes the temporal and spatial trends of WUE on the Loess Plateau after the Grain for Green Project, and further uses CMIP6 to predict the WUE's of Loess Plateau under three scenarios. The results show that vegetation in the Loess Plateau increased significantly from 2001 to 2015, and that GPP and ET increased at rates of $3.59 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}$ and 4.39 mm per year, respectively. WUE increased in 72.68% of the regions with an average annual $0.003 \text{ g C}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ increase. In the three scenarios from 2015 to 2100, ET showed an increasing trend while GPP and WUE did not change much in SSP126 and increased significantly in SSP245 and 370 scenarios. WUE increased with the increase of GPP. WUE combines "consumption" and "use" of water resources to illustrate the effectiveness of the Project. Although the revegetation increases regional water consumption, it has significantly improved the vegetation cover, effectively enhanced the carbon sequestration capacity and water use efficiency of the vegetation, and increased the drought tolerance of the entire Loess Plateau vegetation. The WUE's of different tree species need to be further analyzed to screen out the tree species with higher drought resistance for vegetation restoration. The ecological construction and water conservation of the whole region is an eternal topic, and the healthy development of water-carbon cycle should be improved in current climate context in order to provide a better theoretical guarantee for the synergistic development of economic construction and ecological civilization of the Loess Plateau.

Keywords Loess Plateau; water use efficiency; Grain for Green Project; vegetation restoration ●



(责任编辑 刘志远)