

黄河源区气候—植被—水文协同演变及成因辨析

莫兴国^{1,2}, 刘苏峡^{1,2}, 胡 实¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学资源与环境学院/中丹学院, 北京 100049)

摘要: 全球变化下黄河源区水文过程的演变影响流域生态系统的水源涵养功能, 流域植被改变也影响水循环。本文基于气候、植被信息和VIP分布式生态水文模型, 开展黄河源区水碳循环要素变化的集成模拟, 分析了气候—植被—水文要素的协同演变机制。结果表明, 2000年以来黄河源区气候呈暖湿化趋势; 植被绿度明显提高, 2010—2019年比2000—2009年平均增加了4.5%; 生长季延长了至少10 d; 植被生产力(GPP)显著上升, 倾向率为 $4.57 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 植被恢复措施对GPP变化的贡献约为23%, 气候变化和大气 CO_2 升高的施肥效应的贡献为77%。源区植被蒸散量(ET)呈增加趋势, 倾向率为 2.54 mm a^{-1} , 水分利用效率(WUE)亦提高, 平均相对上升率为 $5.1\% \text{ a}^{-1}$ 。GPP、ET和WUE年总量及其变化率在海拔4200 m以下随高度上升而减小, 之后变化趋缓。源区植被绿度和径流系数与当年和前一年降水呈显著正相关, 反映降水蓄存于植物根层土壤的遗留效应。蒸散增强在一定程度上有利于源区地表—大气之间的水分再循环, 帮助缓解生态恢复引起的产水能力下降, 促进降水—植被—径流之间的良性互馈关系的形成。揭示水文对气候变化和植被恢复的响应和互馈机制, 可为生态恢复措施对源区水源涵养功能的影响及效应的定量评估提供科学依据。

关键词: 生态水文; 蒸散; 植被生产力; VIP模型; 气候变化

DOI: 10.11821/dlxb202207011

1 引言

气候变化和人类活动改变陆地生态系统的水碳循环过程, 使流域生态系统水碳效益发生变化, 相应地影响水源涵养能力^[1]。顾名思义, 水源涵养主要指植被冠层、地表凋落物的降水截留拦蓄, 暴雨洪峰和径流丰枯的季节变化调节, 降水再循环等。植被类型、覆盖度和根系密度影响冠层降水截留蒸发、土壤入渗、太阳辐射反照率和能量耗散(潜热、感热和热辐射)。当林地覆盖度增加而减少冠层空隙时, 太阳辐射穿透率下降, 反照率可能增加, 从而土壤—冠层系统获得能量减少, 导致土壤蒸发下降。另一方面, 大气 CO_2 浓度升高的“施肥效应”和气候变暖可改变叶片气孔导度和下垫面能量分配, 增强植被的碳同化功能, 同时减弱蒸腾速率, 提高植被水分生产力。地表覆盖度的提高, 将通过地表能量平衡, 改变蒸散发、土壤含水量和地下水的补给, 有利于流域水源涵养功能的提升。另一方面, 在生态脆弱的高原地区, 人类活动, 如草场放牧和农业开垦, 影响植被地上生物量的累积和群落结构。如果放牧过度, 将引起草地生态系统退化、土壤

收稿日期: 2021-07-23; 修订日期: 2022-04-07

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0106500); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20040301) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2018YFE0106500; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA20040301]

作者简介: 莫兴国(1966-), 男, 广西桂林人, 博士, 研究员, 研究领域为生态水文模型与气候变化。

E-mail: moxg@igsrr.ac.cn

入渗能力下降和侵蚀加剧^[2-3]。尽管实际观测证实, 植被恢复伴随蒸腾量上升, 导致流域总产水量下降; 毁林增加产水量, 但是植被变化对河道基流的影响仍然难以确定^[4-5]。另外, 植被恢复对径流的影响在水分限制地区往往比湿润地区更明显^[6]。气候—植被—水文的协同演变会出现所谓的“干旱悖论”或“湿润悖论”现象^[7], 即一般而言早年或者旱季植被可能遭遇枯萎, 河道径流剧减。然而在干旱发生的季节或偏早年份, 由于天气晴好, 温度升高, 大气蒸发力增加, 植被蒸腾和光合作用增强, 植被绿度反而提高; 而相应的植被总耗水增加, 导致流域径流下降幅度大于降水减少幅度; 而在湿润季节或年份, 情况则相反。因此, 气候变化下流域气候—水文—植被的协同演变是一个复杂的互馈过程, 影响生态系统水碳循环与水源涵养能力, 需要深入研究。

黄河源区位于青藏高原东偏北方向, 是黄河的主要水源地, 素有“水塔”之称, 受西风和季风两大环流系统的影响, 气候复杂多变, 是全球气候变化响应的敏感区域。近几十年来, 黄河源区气候、生态和水文要素都发生了明显变化^[8-11]。源区气温呈持续上升趋势, 幅度大于全球和全国平均水平。同期年降水量增加明显, 主要表现于春、夏、冬3个季节的降水变化^[12]。因温度和降水的增加, 源区潜在蒸散和地表实际蒸散都呈上升趋势^[13-15]。源区径流存在丰枯交替的年代际周期性变化, 总体上呈减少趋势, 但近年来径流回升明显^[12, 16]。根据卫星遥感影像的解译发现, 流域内湖泊水体面积呈先萎缩后扩张的趋势^[17-19], 气候变暖导致冰川融化和降水回升, 是水体扩张的重要原因^[20]。同时, 流域内季节性积雪面积减少, 永久冻土层的最大厚度呈下降趋势, 表现为活动性冻土层变厚、滞水层时空分布改变, 进而加速土壤水下渗, 导致地下水位抬升, 包气带水储量逐渐增加^[21-23]。另一方面, 对20世纪80年代以来源区遥感植被指数变化的分析显示, 流域植被覆盖度和生产力呈明显上升趋势^[24], 沙化面积减少^[25], 气候变化是植被覆盖改善的主要贡献者, 草地保护和治理起到了促进作用。

然而, 在降水不足的地区, 气候变暖引起的季节性冻土快速消融改变土壤墒情, 通常加重植被的水分胁迫, 不利于植被光合和干物质积累。永久冻土层的退化导致地下水位下降, 源区部分草甸草原向典型草原退化, 土壤侵蚀加重^[26]。遏制黄河源区生态系统退化和提高水源涵养功能是黄河上游保护性开发的重要任务。自2005年起, 国家相关部门以三江源等为重点, 推进实施了一批重大生态修复、保护和建设工程, 旨在改善生态与环境, 提升水源涵养能力。然而源区的水源涵养不仅仅是流域上游重要生态服务功能的体现, 也是气候—水文—植被协同演变的纽带。根据文献梳理, 发现气候变化下源区植被恢复与流域产水量之间是正向还是反向关系仍未阐释清楚。因此, 进一步揭示气候、植被与水文之间的协同演变机制, 有助于夯实流域水源涵养和生物固碳潜力提升的科学认识, 实现生态系统服务功能的稳定和可持续发挥。本文采用VIP (Vegetation Interface Processes) 生态水文模型, 结合遥感植被信息, 模拟黄河源区水循环演变过程, 分析水碳循环要素变化及其相互作用, 为制定黄河源区生态恢复、水源涵养功能提升措施提供科学依据。

2 研究数据与方法

2.1 流域概况

黄河源区坐落于青藏高原东部边缘, 定义为唐乃亥 (藏语, 意为黑滩) 水文站断面以上流域。面积121972 km² (95.5°E~103.5°E, 32.0°N~36.5°N), 主河道全长1553 km, 水流稳定, 多年平均流量约200亿m³, 占黄河流域径流量的34.5%。黄河源区平均海拔

为4300 m (图1a), 西部以巴颜喀拉山脉与金沙江分隔, 北部为阿尼玛卿山, 高山上冰川积雪终年覆盖。流域内河道蜿蜒曲折, 遍布湖泊、沼泽和草滩, 也有峡谷险滩 (图1b)。地表覆被类型中草地约占80%, 其次是林地、农田。人类活动以放牧、公路修建和居民点扩张为主, 20世纪80年代以来建筑用地呈显著增加趋势, 而林地和农田面积的变化则不明显。

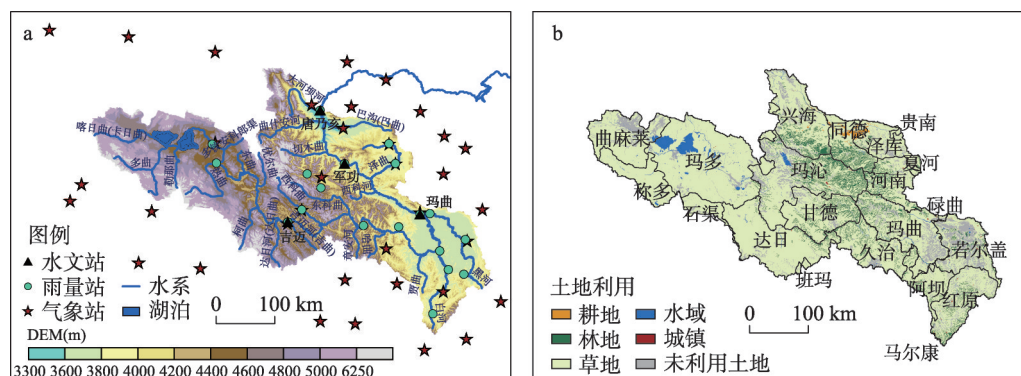


图1 黄河源区DEM、水文和气象站分布和2010年土地利用

Fig. 1 DEM with hydrological and meteorological stations, and land use/cover of the source region of the Yellow River

根据流域内和周边气象站1970—2019年逐日数据 (<http://www.resdc.cn>) 的空间插值, 得到黄河源区多年平均降水量为520 mm, 呈微弱增加趋势; 年平均气温为0.79 °C, 上升速率为0.37 °C (10 a)⁻¹。日照时数和风速下降趋势显著。多年平均参考作物蒸散量 (ET_p) 为746.49 mm a⁻¹, 以0.62 mm a⁻¹速率上升 ($p < 0.05$)。对流域内主要站点 ET_p 变化的归因分析 (因子偏微分法) 表明, 在温度、湿度、风速、日照和eCO₂因子中, 温度变化的贡献为54%~75%, 气候暖化导致的空气水汽压饱和差 (VPD) 增大是 ET_p 上升的主要原因。青藏高原气候受中纬度盛行西风和西南季风的交互影响, 20世纪90年代中期之后西风系统减弱, 西南季风加强^[27], 这是近年来黄河源区 ET_p 显著上升的主要原因。

通过 Google Earth Engine 解译 Landsat 影像得到流域多年平均水面面积为2114.48 km², 流域内湖泊水体面积扩张, 其中20世纪90年代、21世纪初10年和21世纪10年代夏季 (7—8月) 冰川积雪面积分别为778.39 km²、401.56 km²和797.28 km²。2001年以来降水增多, 冰川面积由下降转为上升^[19]。

流域出口径流的季节变化呈双峰型, 峰值通常出现在7月和9月。初夏季节积雪融化和降雨产流导致河道流量快速上涨, 而9月份的径流高峰则主要由夏季大雨和暴雨引起。1961—2019年流域多年平均径流深为169.19 mm, 其中6—10月的径流占全年的71.1%。2000年以来流域年降水和产水量呈增加趋势, 降水和径流深的倾向率分别为7.47 mm a⁻¹和4.86 mm a⁻¹ ($p < 0.01$)。

2.2 数据来源

地表植被状态数据包括16 d的MODIS 标准化植被指数 (NDVI) 和8 d叶面积指数 (LAI) 最大值合成数据产品 (MOD15A2) (<https://lads web.nascom.nasa.gov>), 时间跨度为2000—2019年, 空间分辨率为1 km。遥感数据投影转换为兰伯特等积方位投影, 并进行S-G (Savitzky-Golay)滤波校正, 以便剔除云覆盖导致的奇异低值点; LAI数据序列中的缺值由NDVI-LAI关系曲线进行插补。

数字高程、土地利用和土壤质地数据来源于国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/>), 空间分辨率为 1 km。

陆地水储量变化来自 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) RL05 版本数据, 空间分辨率为 0.5° (<https://grace.jpl.nasa.gov/data/get-data/monthly-mass-grids-land/>)。

海北试验站提供的水汽和 CO_2 通量观测数据 (<http://www.cern.org.cn/data>) 用于模型验证。通量观测站位于青海湖北部 ($37^\circ36'\text{N}$ 、 $101^\circ20'\text{E}$, 海拔 3160 m), 下垫面植被类型为高寒灌木矮嵩草 (*Kobresia humilis*) 草甸, 土壤为亚高山草甸土。夏季植被盖度可达 98% 以上, 灌丛平均高度约为 25 cm, 地上生物量在 $330\sim467\text{ g m}^{-2}$ 之间。

2.3 模型简介

流域水文生态要素的变化和驱动机制的解析主要依靠数学物理模型的仿真模拟。陆地生态系统水碳氮耦合循环机理模型, 通常称为生态水文模型, 采用尺度上延 (Bottom Up) 方法, 由局地扩展到流域。在冠层尺度, 植被冠层光合—蒸腾过程耦合, 优化调控生态系统碳循环和水循环; 在流域尺度, 通过数学方法描述气候、水文、地形地貌、土壤和植被之间的耦合与互馈关系, 生态水文模型能够重现时空高度分异的生态水文要素变化格局。鉴于生态水文机理模型能清晰地表达生态系统与水文变化之间的因果关系, 这些模型广泛用于分析和预测环境变化对流域水碳氮循环过程的影响, 为水资源管理、生态修复提供决策支持。

VIP 模型是从单点尺度上延到流域和区域尺度的生态水文动力学模型^[28-32]。基于垂向的土壤—植被—大气系统物质和能量传输和转换机理, 以及水平方向的坡面和河道汇流过程, 涵盖了坡面辐射、植被冠层辐射传输、能量转化、植被光合与生物量累积、坡面产流和河道汇流、土壤碳氮循环等过程。模型中植被冠层划分为受光叶和荫蔽叶, 叶片尺度的水热碳交换由蒸腾与光合作用过程耦合求解; 植被动态模块包括光合产物的累积和分配, 以及物候期等; 土壤碳氮模块包括碳氮库的分解和转化过程; 水文模块包括地表降雨产流、积雪和融雪、土壤水动态、地下水出流和河道汇流等过程 (图 2)。本文将 VIP 模型与卫星遥感信息结合, 模拟黄河源区植被耗水 (ET)、土壤水分、径流、第一性生产力 (GPP) 和植被水分利用效率 (WUE) 等。WUE 定义为年 GPP 与 ET 之比, 反映生态系统水分消耗的固碳效率。

流域按 1 km 网格进行划分, 大气驱动由流域内和周边气象站逐日气象数据按反距离梯度平方法插值而得, 要素包括气压、气温 (日平均、最高和最低值)、相对湿度、风速、降水和日照等 8 个要素, 并对气温、辐射下延到小时尺度, 体现气温和辐射的日内变化过程。植被叶面积指数由 MODIS LAI 8 d 的数据采用拉格朗日法插值到日尺度。模拟时段为 1999—2019 年, 模拟步长为 1 h, 其中第一年为预热期。

VIP 模型是基于过程的机理模型, 模型参数都有明确的物理含义, 这些参数的取值主要根据当今陆面过程模型、生态系统模型普遍认可的参数值而设定。在黄河源区的模拟中, 关键参数是植物光合能力参数 (V_{cmax}) 和降水产流方案中的饱和土层厚度参数, 两个参数分别利用海北站的 ET 和 GPP 的涡度相关通量数据、流域径流深进行调参确定。

2.4 趋势和因子贡献率分析

采用 Mann-Kendall 非参数分析和 Pettitt-t 突变点检测方法分析 ET、GPP 和 WUE 的趋势性变化, 趋势的显著水平由下式计算:

$$\frac{-1-t_p\sqrt{n-2}}{n-1} \leq r \leq \frac{-1+t_p\sqrt{n-2}}{n-1} \quad (1)$$

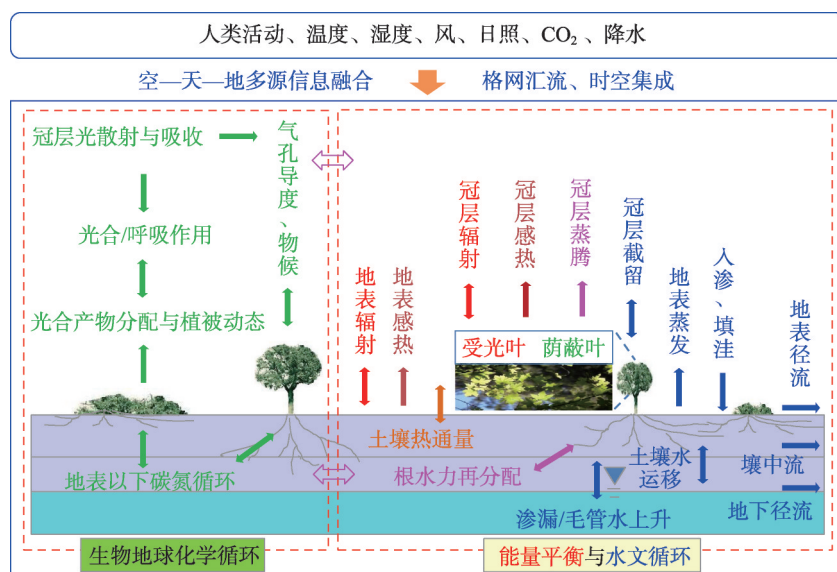


图2 VIP生态水文动力学模型结构

Fig. 2 Framework of the VIP ecohydrological dynamic model

式中： r 是变量和时间的Pearson相关系数； t_p 为显著性水平 p 相应的统计检验值；当 p 为0.1、0.05和0.01时， t_p 分别取值1.645、1.96和2.575； n 为样本长度，详见文献[33]。

采用情景模拟法确定气候变化和植被恢复对ET和GPP贡献率。首先设定植被LAI、大气 CO_2 浓度没有年际变化，运行模型，获得相应情景下的ET和GPP。然后与现实情景的ET和GPP变化趋势相比，计算气候变化、 CO_2 和植被恢复的相对贡献率。

3 结果分析与讨论

3.1 模型验证

以参考高度小气候要素的小时尺度观测数据为驱动，采用VIP模型模拟海北站草地2003—2010年的生态水文过程，利用涡度相关系统同期观测的逐日GPP、ET值验证模拟结果（图3）。模拟值和观测值之间具有较高的相关性，相对均方根误差（rRMSE）在30%~40%之间。由图可见，2003—2005年的GPP模拟值与观测值的一致性较高，但2006—2010年早春和初冬的GPP观测值明显偏高，不符合高原植被休眠的现实情况，很可能是观测误差所致。根据该站气温观测资料，1959—2018年10月到次年3月多年日平均气温在 0°C 以下，2006—2010年这几个月的日平均、日最高和日最低温度均呈降低的趋势（ $p < 0.01$ ），所以植被没有复苏生长的热量条件，光合速率应该很低。

另外，利用流域出口站（唐乃亥）日径流量验证模拟的径流量，两者的N-S效率系数（NSE）为0.65，模拟预测的径流和实测径流基本一致，相对误差小于5%。2003—2019年GRACE重力卫星反演的陆地水储量变化（TWSA）的流域平均值变化范围在 $\pm 30\text{ mm}$ 之内，与模拟的水储量变化范围基本一致（ $\pm 38\text{ mm}$ ）。

3.2 流域蒸散与植被生产力格局

根据MODISNDVI和LAI的时间序列分析，2000年以来黄河源区植被平均LAI为0.58，呈上升趋势（ $p < 0.05$ ），2010—2019年LAI平均值比2000—2009年提高了4.5%。

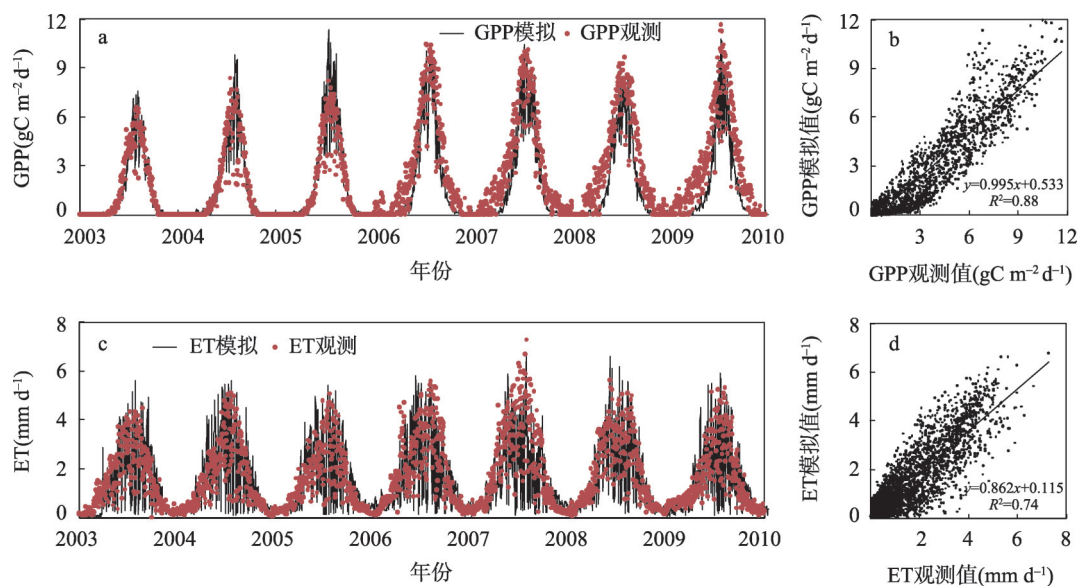


图3 海北站日尺度植被总初级生产力(GPP)和蒸散(ET)模拟值与涡度相关观测对比

Fig. 3 Validation of the simulated daily ET and vegetation GPP with the eddy covariance fluxes at the Haibei alpine grassland station

根据VIP模拟结果, 2000—2019年流域平均年总蒸散量(ET)为 (397.7 ± 26.9) mm, 其中冠层蒸腾量(E_c)为 (143.6 ± 9.2) mm, 冠层蒸腾(E_c)占总蒸散量(ET) 36.1%, 其中草地和农田覆被类型的植被蒸腾与蒸散占比分别为38.0%和54.4%, 说明流域内植被覆盖度偏低, 大部分蒸散为无效耗水。与降水(图4a)和潜在蒸散(图4b)的空间分布格局相呼应, ET年总量由东南低海拔区向西北高海拔地带快速递减, 空间分异性为21.3%(图4c)。蒸腾的分异性更高, 达51.2%, 林地、草地和耕地的ET多年平均值分别为437.1 mm、396.6 mm和520.9 mm, 湖泊水面平均年蒸发量为877.5 mm。

植被总初级生产力(GPP)年总量空间格局(图4d)与降水和ET年总量的空间格局一致, 说明降水是黄河源区植被生产力的主导因子。流域多年平均GPP为 (529.2 ± 60.5) $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 空间分异性为51.6%, 年际变异性为11.4%, 高于ET的年际变异性(6.4%)。

3.3 ET和GPP长期变化趋势及影响因素

利用M-K方法进行趋势检验, 发现流域几乎所有格点的ET年总量都呈上升趋势, 平均倾向率为 2.54 mm a^{-1} (图5a), 高于1981—2015年ET年总量的上升速率($1.43 \text{ mm (10 a)}^{-1}$)^[14]。黄河源区ET显著上升($p < 0.05$)的面积占流域总面积的88.1%, 主要分布在中下游海拔相对较低的地区, 包括若尔盖、玛曲、同德、泽库等县; ET呈弱上升趋势的地区主要在西北部上游的高海拔、低植被覆盖地区。黄河源区降水、饱和水汽压差(VPD)和地表短波总辐射的增加是ET增加(即陆面—大气水汽交换加强)的主要驱动因子, 而风速下降则减缓这一趋势。

流域内各土地利用类型的ET年总量倾向率在 $2.14 \sim 2.62 \text{ mm a}^{-1}$ 之间, 其中耕地ET增长最快, 草地次之; 湖泊水面年蒸发量上升速率为 0.89 mm a^{-1} , 明显低于草地ET的倾向率, 主要原因是水面蒸发上升趋势取决于大气温、湿、风和太阳辐射的变化, 不受降水量上升趋势的影响。通过对比植被LAI去趋势化后的ET模拟结果, 发现LAI增长仅贡献了约10%的ET变化, 而气候变化的贡献则约占90%。由于大气 CO_2 浓度升高($e\text{CO}_2$)抑

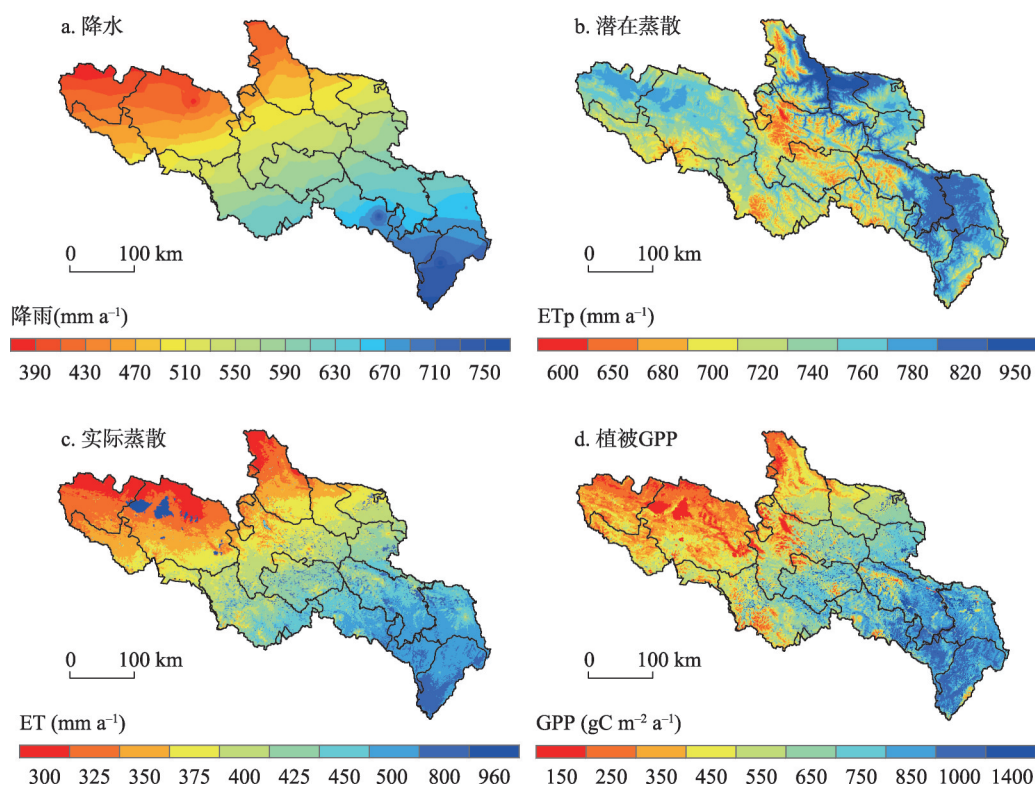


图4 黄河流域多年平均蒸散和植被生产力

Fig. 4 Multi-year averaged annual ET and GPP at basin scale in the source region of the Yellow River

制了叶片气孔开张和蒸腾速率，尽管植被绿度有所提高，土壤蒸发的加强仍高于蒸腾，导致植被蒸腾的相对上升速率（57%）低于总蒸散（64%）。

与ET相似，植被GPP年总量呈显著上升趋势，平均倾向率为 $4.57 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($p < 0.01$)。流域尺度上，植被覆盖格点的GPP几乎都呈增加趋势，其中显著上升的面积比例高达91.2%（图5b），主要分布于中下游地区，其中唐乃亥水文站附近植被生产力的提高尤为明显，体现了三江源生态保护政策实施以来退耕和维持草畜平衡措施的生态效应。通过对比去除植被叶面积指数和大气 CO_2 浓度变化趋势后的植被生产力模拟结果，得到气候变化、 eCO_2 和植被恢复对GPP提高的贡献率分别为52.3%、24.4%和23.3%，由此可知GPP趋势性变化虽以气候暖湿化的贡献为主，但植被恢复的贡献也很重要。气候变暖除了有利于光合固碳外，也延长了植物生长期。选择每年最大和最小NDVI值之差的30%作为植物春季返青和秋季枯黄的起始点，结果显示2015—2019年与2000—2004年相比，返青期提前了5~10 d，叶片枯黄期则延后了5~10 d。姚玉璧等^[34]应用Thornthwaite Memorial模型模拟也得到黄河源区气候植被生产力呈上升趋势的结论，认为降水量、蒸发力和最低气温是主要气候影响因子。

大气 eCO_2 抑制蒸腾却促进光合，植物生长累积量和冠层覆盖度增加，从而提高水分利用效率（ $\text{WUE} = \text{GPP}/\text{ET}$ ）。黄河源区植被平均WUE为 $(1.33 \pm 0.06) \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ，相对倾向率（倾向率/平均值）为 $5.1\% \text{ a}^{-1}$ ($r^2 = 0.52$ 、 $p < 0.001$)，其中显著上升的面积比例为43.7% ($p < 0.05$)，主要分布于水分和热量条件较好的下游以及河谷地带（图6）。

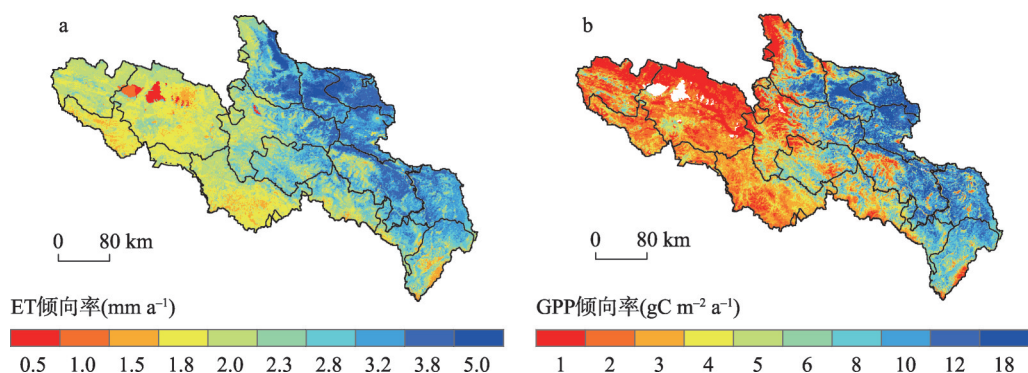


图5 黄河流域年蒸散和植被生产力倾向率的空间格局

Fig. 5 Trends of annual ET and vegetation GPP over the source region of the Yellow River

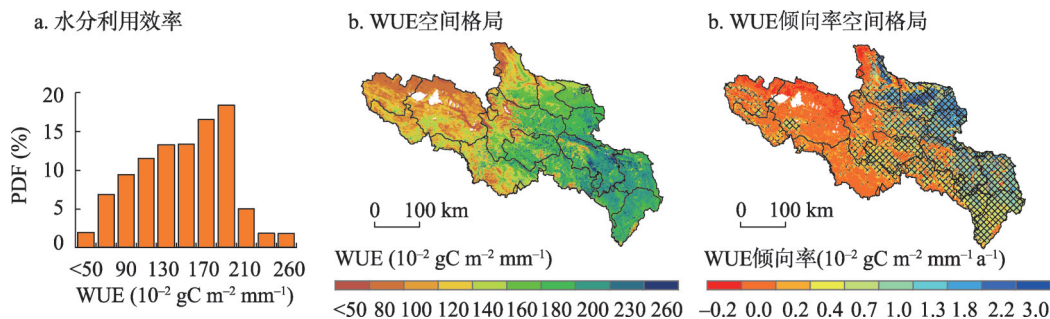


图6 流域多年平均植被水分利用效率及其倾向率的空间格局

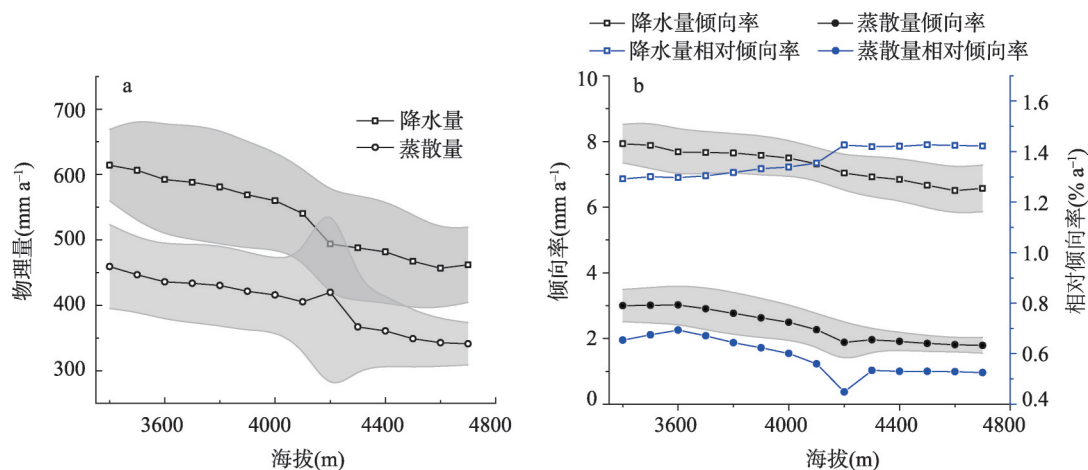
Fig. 6 The frequency and spatial patterns of the vegetation water use efficiency and the trends over the source region of the Yellow River

分析表明,下一年度的WUE的年际波动与降水和温度的呼应要强于本年度WUE与降水和温度的呼应,说明暖湿对植被WUE的提高具有遗留效应。按WUE变化范围($0.05 \sim 2.60 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$)分段平均其对应的倾向率,发现WUE在 $1.5 \sim 2.0 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ 之间倾向率最高,但其相对倾向率却随WUE的增加而线性下降,说明在水热条件欠佳的情况下,气候暖湿化更能促进植被生长和WUE的提高。

3.4 ET和GPP年总量及其时变趋势随海拔的变化

在海拔3300~5000 m之间,ET年总量及其倾向率随海拔升高而呈近似线性降低,ET递减率大致为 $9.1 \text{ mm (100 m)}^{-1}$,该变化型与降水量随海拔变化一致,其中ET年总量在海拔4200 m处的增加主要是鄂陵湖和扎陵湖的水面蒸发较高所致(图7a)。另一方面,降水的相对倾向率(倾向率/降水量)随海拔增加而增加,而ET的相对倾向率却随海拔升高而降低(图7b)。这个现象说明,虽然高海拔地带的降水增加更明显,但较低海拔地带因生境更适宜植被生长,地表绿度对降水变化的响应反而更显著。

GPP年总量随海拔的升高而快速减少,负相关系数为0.70,说明气候变化对较低海拔植被的影响更显著。GPP倾向率也随海拔升高而降低,虽与ET随海拔的变化特征相似,但变化更剧烈(图8),表明海拔3500 m以上地带的热量条件逐步成为植被生长的限制性因子,植被生产力的空间格局由温度随海拔而降低的梯度分布主导。流域西部地区因海拔高、气温低和热量不足而限制冠层叶片光合作用速率,水分胁迫则是次要因子,植被生产力维持在较低水平。



注：灰色区域表示标准差范围。

图7 流域平均年降水量和蒸散量及其倾向率随海拔高度的变化

Fig. 7 Annual precipitation and ET and their trends along with the elevation above sea level

3.5 气候—植被生产力—水文要素的协同演变

3.5.1 水分利用与生产力变化的协同性

对生态系统而言，其水分利用效率主要受控于冠层叶面积指数 (LAI) 和叶片的光合能力，中轻度土壤水分亏缺和空气饱和水汽压差可引起植被水分利用效率 (WUE) 的正向响应，体现生态系统对环境胁迫的弹性。生态系统 WUE 具有保守性，当叶面积指数较低时 (冠层 LAI 尚未达到 1.0)，冠层蒸腾与总蒸散之比、植被 GPP、ET 随 LAI 基本上呈线性增加 (图 9a、9b、9c)，尔后逐渐趋于相对稳定状态。WUE 亦随 LAI 线性增加；当 LAI > 1.0 之后，WUE 趋于稳定，约为 $1.8 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ (图 9d)，该变化特征与冠层蒸腾与总蒸散之比随 LAI 变化过程相似 (图 9a)。流域内大部分地区 Ec 占 ET 的比例小于 0.6 (图 9a)。由此推论，在黄河源区植被和气候环境尚未显著改变的情况下，若通过人工途径恢复植被，大幅度提高地表覆盖率，植被将消耗更多水分，影响流域的产水能力和生态系统的水源涵养功能。

3.5.2 气候—植被—水文要素的协同演变 全球变化有利于高纬度或高海拔热量不足地区植被生长条件的改善。近几十年来，由于气候变化和三江源生态保护政策的实施，黄河源区植被总体生长状况趋好，覆盖度提高，吸收的太阳辐射能增加；另一方面，冠层的降水截留和土壤入渗量也增加，土壤水分和陆地水储量呈上升趋势^[35]。由图 10a 可见，在流域水碳通量中，降水、GPP 和 ET 大于蒸腾和地表径流 (Water Yield, WY)。随着年降水量的增加，植被蒸散发量上升，径流也相应增加，主要生态水文要素都呈正向变化 (图 10b)，降水和植被 GPP 的相对倾向率高于 ET 和蒸腾的相对倾向率，但低于流域产水量的变化率。降水、蒸腾和 GPP 的年际变异系数 (CV) 分别为 12.5%、11.1% 和 11.4%，

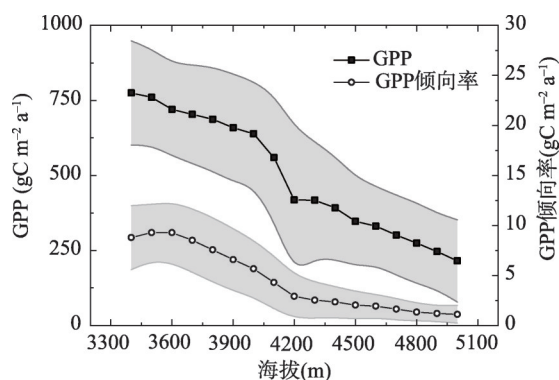


图8 年均GPP及其倾向率随海拔高度的变化

Fig. 8 Variation of average GPP and their trends with elevation

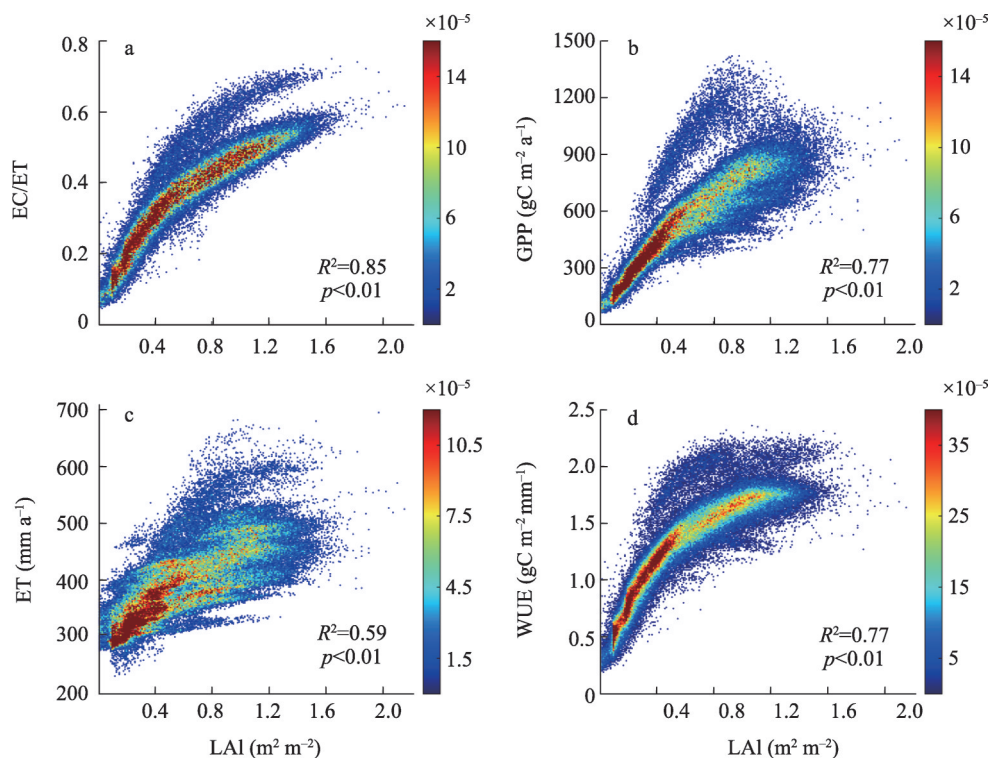


图9 植被水分消耗、生产力与叶面积指数的关联

Fig. 9 Relations among vegetation water consumption, productivity and LAI

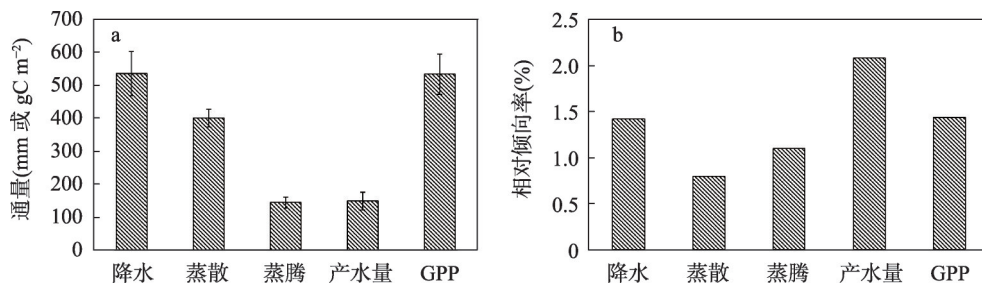


图10 流域平均水碳通量及其相对年际倾向率

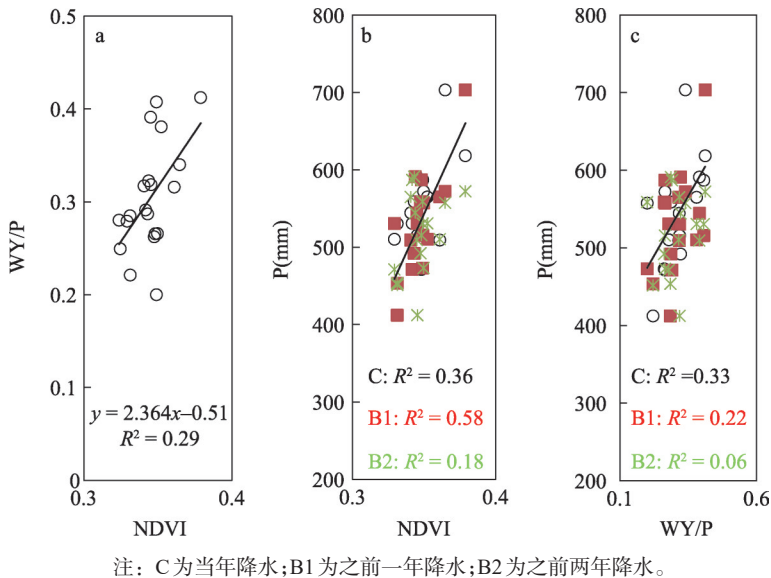
Fig. 10 Basin averaged water and carbon fluxes and their relative trends

三者基本一致,体现了水文—植被的协同性演变。然而,同期大气蒸发力仅微弱上升,说明潜在蒸散和实际蒸散的变化虽然同向,但后者受降雨长期变化趋势的主导。

GPP年内变化表现为单峰型,7月份最高,与温度和辐射的季节变化一致。纵观年内变化,只有5月和7月的GPP年际变化显著($p < 0.05$),其中五月份降水量和GPP的上升趋势皆达到0.05的显著性水平。除降水与GPP在空间上有较高的关联性外($r = 0.75$),两者的年际倾向率之间也有明显的关联性($r = 0.41$),表明降水也是GPP年际波动的重要调节因子。

根据植被指数与流域径流深的相关性分析,发现两者呈明显的正相关,即降水量增加,植被趋好,流域水源涵养能力也随之提高。从植被蒸散角度而言,流域尺度上NDVI与 $(P-ET)/P$ (表征水源涵养量)呈正相关(图11a),说明植被恢复有利于水源涵养

能力的提高。纵观2000—2019年黄河源区气候、生态和水文的变化,其中2000—2002年气候较为干旱,植被指数和年径流量都较低;2003—2016年期间降水量变化平稳,年平均NDVI和年径流也都无明显变化趋势;2017—2019年降水明显增多,径流也随之增加。在本文研究时段,降水、径流和NDVI距平的相对变化分别位于-22.6%~32.1%、-44.6%~55.1%和-6.2%~9.8%之间,可见径流对降水变化的响应有放大效应,而植被绿度的动态响应幅度则较低,主要由于在干旱半干旱地区草地的光合产物大部分分配于地下,植被绿度的变化与降水并不完全一致。在年尺度上,降水与径流的变化基本同步。虽然2016年降水为平年,但径流深却探底,原因是该年降水季节分配比其他年份均匀,地表径流较少,仅出现了3次相对较低的洪峰。根据相关分析,发现年径流系数(WY/P)、生长期植被指数与年降水量之间存在显著相关($p < 0.05$),也存在一年的滞后相关($p < 0.05$) (图11b、11c),说明植被绿度与流域径流系数的变化主要取决于当年和(或)前一年的降水状况,降水对NDVI的影响可延续两年($p < 0.05$)。



注: C为当年降水;B1为之前一年降水;B2为之前两年降水。

图 11 年尺度流域平均径流系数、植被指数和降水之间的相关关系

Fig. 11 Relationship between annual runoff coefficient and NDVI, between runoff coefficient and precipitation, and between NDVI and precipitation averaged over the basin

植被恢复,蒸散增加并不意味着径流就必然减少。青藏高原地面蒸散到大气的水汽有很大一部分再循环形成本地降水,Zhao等^[36]报道该比例约为23%。作为高原的一部分,黄河源区植被蒸散也有一部分参与本流域水分再循环。更大尺度上,三江源区生态恢复和气候暖化所导致的植被蒸散加强,对黄河源区降水—蒸散内循环将起着正向作用。因此,植被生态恢复导致的植被耗水量增加可促进流域水汽再循环,提升流域水源涵养能力,降低植被恢复的代价^[37]。因此,青藏高原区大尺度植被恢复、地表覆盖度提高有利于源区降水的增加,维持生态系统服务功能的可持续发挥,增强生态屏障功能。

阿尼玛卿山和巴彥喀拉山冰川积雪融水补给是黄河源区径流的重要组成部分。一般说来,气温升高,将促进冰雪融化,导致河川径流增加;另一方面,气候变暖,植被改善,地表反照率降低,有利于地表吸收太阳辐射能,同时温度上升导致空气VPD增大,促进地表土壤蒸发失水,在相同降水条件下,地表径流减少。整体而言,冰雪消融和土

壤蒸发的强弱共同决定气候变化在流域尺度上径流效应是正还是负。然而,当有植被调节时,这个机制则变得更加复杂。概括起来,有两个情景:

情景1:植被生长趋好,GPP增加,ET相应增加(δET),分为两种状况:①降水减少(δP),流域出口断面流量将减少;②降水增加。以上两种状况分别对应两种情形:① $\delta P < \delta ET$,流域出口断面流量将减少;② $\delta P > \delta ET$,则流域出口断面流量将增加。

情景2:与情景1相反,即流域植被退化,GPP减少,ET也相应减少,也对应两种状况:①降水增加,流域出口断面流量将增加;②降水减少。这两种状况也分为两种情形:①ET减少更多,即 $|\delta P| < |\delta ET|$,流域出口断面流量增加;②降水减少更多,即 $|\delta P| > |\delta ET|$,则流域出口断面流量将减少。

由上述分析可知,无论是植被趋好还是退化,流域出口断面的流量都可能出现增加或减少的现象,这表明仅仅用植被生态功能指标来刻画流域的治理尚显不足,应将其与流域出口断面流量指标相结合,共同刻画流域水源涵养功能的禀赋。很显然,假若只描述生态和水源涵养功能,自1990年以来黄河源区处于生态向好、水源涵养功能增强时期。如若加上流域出口断面流量指标,则其向下游供水能力减弱,发展时还要注意生态系统服务功能的权衡。

3.5.3 黄河源区生态恢复和保护政策建议 通过上述模拟分析、文献调研和实地考察获得的认识,针对黄河源区生态环境保护、恢复和可持续管理,提出如下建议:

(1)流域气候—植被—水文存在协同演变,径流对降水变化的响应有放大效应,而植被绿度对降水的响应则具有滞后性。植被绿度与流域径流系数的变化主要取决于当年和(或)前一年的降水状况,丰水年降水的影响可延续两年。所以黄河源区生态恢复和保护措施不能仅评估短期表现,还要考虑其协同演变和长期效应。

(2)黄河源区迄今总的态势是植被绿度和生产力呈增加趋势。该变化以气候暖湿化的贡献为主,植被恢复的贡献次之。生产力增加,导致黄河源区植被耗水亦呈增加趋势,但上中下游具有不同的变化机制,需要区别对待,即:

①中下游海拔相对较低的区域,因生境适宜植被生长,地表绿度对降水变化的响应更显著,是生态恢复的重点区。这些地区草地生产潜力高,应加强草地状态监测,严格控制放牧强度,设计合理的草场配置、轮牧和刈割制度,优化草场资源利用。

②中游的果洛州,气候比较严酷,植被生产力偏低。该区放牧强度大,草地退化,荆棘灌丛蔓延,鼠害尤为严重。建议加强鼠害治理,严格控制放牧强度,减轻草场压力。

③西北部上游区植被生产力和耗水呈弱上升趋势。该区气候恶劣,植被生产力和覆盖度低,应以保护和低强度放牧为主,同时控制矿产和公路开发对生态系统的破坏,维持生态恢复的趋势。

(3)冰雪消融和植被蒸散共同决定环境变化的径流效应,因此应将植被生态功能指标与流域出口断面流量指标结合,共同刻画流域水源涵养功能的禀赋。

4 结论

气候变化和人类活动背景下,黄河源区生态和水文过程在近几十年来呈现了快速变化的特征。本文根据遥感观测的植被和水体信息、气候水文数据和生态水文模型模拟,揭示了唐乃亥以上黄河源区生态水文要素的协同演变特征与驱动机制。

近几十年来黄河源区气候呈暖湿化趋势,植被绿度明显增加,春季植被返青期提前、秋季枯黄期延后,生长期延长10~20 d;流域内湖泊水体面积扩张,土壤湿度呈明显

上升趋势,但夏季冰川面积缩小;黄河干流年径流2000年以来呈增加趋势;植被生产力(GPP)显著上升,倾向率为 $4.57 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,植被恢复的贡献约占23%,气候变化和大气 CO_2 浓度升高的贡献分别为52.3%和24.4%。相应地,流域植被蒸散量(ET)增加,倾向率为 2.54 mm a^{-1} 。GPP增幅大于ET,从而植被水分利用效率(WUE)提高,平均相对倾向率为 $5.1\% \text{ a}^{-1}$ 。GPP、ET和WUE的年总量及其倾向率都随海拔上升而减小,在各海拔高度的协同变化明显,其中3000~4000 m高程范围内变化率最大,而在海拔4200 m以上变化趋缓。降水、大气VPD和短波总辐射的增加是黄河源区地表—大气水汽交换加强的主要驱动因素。黄河源区植被绿度变化与径流系数和降水之间呈显著正相关,并存在一年的滞后期,显示出降水蓄存于植物根层土壤的年尺度遗留效应,有助于植被恢复和流域水源涵养。综上,黄河源区因气候暖湿化和草场保育,生态环境得到明显改善,流域内水循环加强,水源涵养能力的提升促进了生态恢复的可持续性和水源保护,但发展还需要特别注意因地制宜,综合考虑气候—水文—生态的协同演变,顾及生态系统服务功能的权衡。

参考文献(References)

- [1] Liu N, Sun P S, Caldwell P V, et al. Trade-off between watershed water yield and ecosystem productivity along elevation gradients on a complex terrain in southwestern China. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125449. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125449.
- [2] Hilker T, Natsagdorj E, Waring R H, et al. Satellite observed widespread decline in Mongolian grasslands largely due to overgrazing. *Global Change Biology*, 2014, 20(2): 418-428.
- [3] Lu X Y, Kelsey K C, Yan Y, et al. Effects of grazing on ecosystem structure and function of alpine grasslands in Qinghai-Tibetan Plateau: A synthesis. *Ecosphere*, 2017, 8(1): e01656. DOI: 10.1002/ecs2.1656.
- [4] Dennedy-Frank P J, Gorelick S M. Insights from watershed simulations around the world: Watershed service-based restoration does not significantly enhance streamflow. *Global Environmental Change*, 2019, 58: 101938. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2019.101938.
- [5] Filoso S, Bezerra M O, Weiss K C B, et al. Impacts of forest restoration on water yield: A systematic review. *PLOS ONE*, 2017, 12(8): e0183210. DOI: 10.1371/journal.pone.0183210.
- [6] Bai P, Liu X, Zhang Y, et al. Assessing the impacts of vegetation greenness change on evapotranspiration and water yield in China. *Water Resources Research*, 2020, 56: e2019WR027019. DOI: 10.1029/2019WR027019.
- [7] Mastrotheodoros T, Pappas C, Molnar P, et al. More green and less blue water in the Alps during warmer summers. *Nature Climate Change*, 2020, 10(2): 155-161.
- [8] Cuo L, Zhang Y X, Wang Q C, et al. Climate change on the northern Tibetan Plateau during 1957-2009: Spatial patterns and possible mechanisms. *Journal of Climate*, 2013, 26(1): 85-109.
- [9] Meng Xianhong, Chen Hao, Li Zhaoguo, et al. Review of climate change and its environmental influence on the Three-River regions. *Plateau Meteorology*, 2020, 39(6): 1133-1143. [孟宪红, 陈昊, 李照国, 等. 三江源区气候变化及其环境影响研究综述. *高原气象*, 2020, 39(6): 1133-1143.]
- [10] Yin Yunhe, Wu Shaohong, Zhao Dongsheng, et al. Ecosystem water conservation changes in response to climate change in the Source Region of the Yellow River from 1981 to 2010. *Geographical Research*, 2016, 35(1): 49-57. [尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 等. 过去30年气候变化对黄河源区水源涵养量的影响. *地理研究*, 2016, 35(1): 49-57.]
- [11] Zheng Ziyan, Lv Meixia, Ma Zhuguo. Climate, hydrology, and vegetation coverage changes in source region of Yellow River and countermeasures for challenges. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(1): 61-72. [郑子彦, 吕美霞, 马柱国. 黄河源区气候水文和植被覆盖变化及面临问题的对策建议. *中国科学院院刊*, 2020, 35(1): 61-72.]
- [12] Lan Yongchao, Zhu Yuntong, Liu Gensheng, et al. Study of the seasonal characteristics and regional differences of climate change in source regions of the Yellow River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(3): 741-749. [蓝永超, 朱云通, 刘根生, 等. 黄河源区气候变化的季节特征与区域差异研究. *冰川冻土*, 2016, 38(3): 741-749.]
- [13] Wang Zhigui, Wang Suping, Wang Jianbing, et al. Study on the variation characteristics of reference crop evapotranspiration in recent 40 years in source region of Yellow River. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(6): 169-173, 189. [汪治桂, 王素萍, 王建兵, 等. 黄河源区近40年参考作物蒸散量变化特征研究. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(6): 169-173, 189.]

- [14] Qin Y, Yang D W, Gao B, et al. Impacts of climate warming on the frozen ground and eco-hydrology in the Yellow River source region, China. *Science of the Total Environment*, 2017, 605: 830-841.
- [15] Xu S Q, Yu Z B, Yang C G, et al. Trends in evapotranspiration and their responses to climate change and vegetation greening over the upper reaches of the Yellow River Basin. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 263: 118-129.
- [16] Wang Daoxi, Tian Shimin, Jiang Siqi, et al. Research progress of the evolution of runoff in the source area of the Yellow River. *Yellow River*, 2020, 42(9): 90-95. [王道席, 田世民, 蒋思奇, 等. 黄河源区径流演变研究进展. *人民黄河*, 2020, 42(9): 90-95.]
- [17] Li Hui, Xiao Pengfeng, Feng Xuezhi, et al. Lake changes in spatial evolution and area in source region of Three Rivers in recent 30 years. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6): 862-873. [李晖, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 近30年三江源地区湖泊变化图谱与面积变化. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 862-873.]
- [18] Duan Shuiqiang, Fan Shixiong, Cao Guangchao, et al. The changing features and cause analysis of the lakes in the source regions of the Yellow River from 1976 to 2014. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(3): 745-756. [段水强, 范世雄, 曹广超, 等. 1976—2014年黄河源区湖泊变化特征及成因分析. *冰川冻土*, 2015, 37(3): 745-756.]
- [19] Zhou H, Liu S, Hu S, et al. Retrieving dynamics of the surface water extent in the upper reach of Yellow River. *Sciences of the Total Environment*, 2021, 800: 149348. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149348.
- [20] Jiang Zongli, Liu Shiyin, Guo Wanqin, et al. Recent surface elevation changes of three representative glaciers in Anyemaqen Mountains, source region of Yellow River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(2): 231-237. [蒋宗立, 刘时银, 郭万钦, 等. 黄河源区阿尼玛卿山典型冰川表面高程近期变化. *冰川冻土*, 2018, 40(2): 231-237.]
- [21] Jin H J, He R X, Cheng G D, et al. Changes in frozen ground in the Source Area of the Yellow River on the Qinghai-Tibet Plateau, China, and their eco-environmental impacts. *Environmental Research Letters*, 2009, 4(4): 045206. DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045206.
- [22] Liu W B, Wang L, Sun F B, et al. Snow hydrology in the upper Yellow River Basin under climate change: A land surface modeling perspective. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(22): 12676-12691.
- [23] Meng F C, Su F G, Li Y, et al. Changes in terrestrial water storage during 2003-2014 and possible causes in Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(6): 2909-2931.
- [24] Qian S, Fu Y, Pan F. Climate change tendency and grassland vegetation response during the growth season in Three-River Source Region. *Science China: Earth Science*, 2010, 53(10): 1506-1512.
- [25] Chen Qiong, Zhang Yili, Liu Fenggui, et al. A review of land use change and its influence in the source region of the Yellow River. *Resources Sciences*, 2020, 42(3): 446-459. [陈琼, 张懿锂, 刘峰贵, 等. 黄河流域河源区土地利用变化及其影响研究综述. *资源科学*, 2020, 42(3): 446-459.]
- [26] Jin Huijun, Wang Shaolin, Lv Lanzhi, et al. Features and degradation of frozen ground in the sources area of the Yellow River, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(1): 10-17. [金会军, 王绍令, 吕兰芝, 等. 黄河源区冻土特征及退化趋势. *冰川冻土*, 2010, 32(1): 10-17.]
- [27] Kuang X X, Jiao J J. Review on climate change on the Tibetan Plateau during the last half century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(8): 3979-4007.
- [28] Mo X G, Liu S X. Simulating evapotranspiration and photosynthesis of winter wheat over the entire growing season. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 109: 203-222.
- [29] Mo X G, Liu S X, Lin Z H, et al. Simulation the spatial and temporal variation of evapotranspiration in the Lushi Catchment. *Journal of Hydrology*, 2004, 285: 125-142.
- [30] Mo X G, Beven K J, Liu S X, et al. Long-term water budget estimation with the modified distributed model-LISFLOOD-WB over the Lushi basin, China. *Meteorology Atmospheric Physics*, 2005, 90. DOI: 10.1007/s00703-004-0084-9.
- [31] Mo X G, Liu S X, Meng D J. Climate variability impacts on evapotranspiration and primary productivity by assimilating remotely sensed data with a process-based model over Songhua River Basin. *International Journal of Climatology*, 2014, 34: 1945-1963.
- [32] Mo X G, Liu S X, Lin Z H, et al. Terrestrial evapotranspiration and gross primary productivity over China: Spatial-temporal patterns and control. *Ecohydrology*, 2018, 11(4): e1951. DOI:10.1002/eco.1951.
- [33] Liu S X, Deng S S, Mo X G, et al. Indexing the relationship between polar motion and water mass change in a giant river basin. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61: 1065-1077.
- [34] Yao Yubi, Yang Jinhu, Xiao Guoju, et al. Change feature of net primary productivity of natural vegetation and its impact factor in the source region of Yellow River in recent 50 years. *Plateau Meteorology*, 2011, 30(6): 1594-1603. [姚玉璧, 杨金虎, 肖国举, 等. 近50年黄河源区植被净初级生产力变化特征及其影响因素. *高原气象*, 2011, 30(6): 1594-

1603.]

- [35] Deng M S, Meng X H, Li Z G, et al. Responses of soil moisture to regional climate change over the Three Rivers Source Region on the Tibetan Plateau. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(4): 2403-2417.
- [36] Zhao Y, Zhou T. Interannual variability of precipitation recycle ratio over the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126: e2020JD033733. DOI: 10.1029/2020JD033733.
- [37] Cheng L, Zhang L, Wang Y P, et al. Recent increases in terrestrial carbon uptake at little cost to the water cycle. *Nature Communications*, 2017, 8: 110. DOI: 10.1038/s41467-017-00114-5.

Co-evolution of climate-vegetation-hydrology and its mechanisms in the source region of Yellow River

MO Xingguo^{1,2}, LIU Suxia^{1,2}, HU Shi¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment/SDC College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Vegetation recovery under global change and its consequent evolution of eco-hydrological processes have modulated the water resources conservative capacity in the source region of the Yellow River (YRSR). Based on climatological data, remotely sensed vegetation index and geographical information, the integrated simulations of water and carbon cycles in the YRSR are presented, with the vegetation interface processes (VIP) distributed eco-hydrological dynamic model. Then the co-evolving mechanisms of hydrological and vegetation dynamics are investigated. Results show that warming and wetting climate in the YRSR has improved the vegetation growing condition and extended the growing period for more than 10 days in recent decades. Averaged NDVI from 2010 to 2020 increased by 4.5% relative to that from 2000 to 2009. Vegetation gross primary productivity (GPP) shows a significant uptrend with a rate of $4.57 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 77% of which is contributed by climate change and elevated atmosphere CO_2 fertilization, and the rest 23% is by vegetation greening. Evapotranspiration (ET) is increasing at a rate of 2.54 mm a^{-1} and vegetation water use efficiency (WUE, expressed as GPP/ET) is also improving at a relative rate of $5.1\% \text{ a}^{-1}$. Generally, annual ET, GPP and WUE and their trends are decreasing along the elevation below 4200 m. At basin scale, there are significant positive correlations between the vegetation greenness and the runoff coefficient with precipitation in the current and previous years, demonstrating a legacy effect of precipitation for vegetation recovery on water conservation capacity. The increased ET might be a benefit to the water recycle between land surface and atmosphere, which will alleviate the reduced potential of water yield owing to ecological restoration and establish trades-off and synergies among precipitation, vegetation and water yield. Conclusively, exploring the mechanisms of hydrological responses to climate change and vegetation recovery and its feedback will provide scientific support to the assessment of ecological engineering programs in the source regions.

Keywords: ecohydrology; evapotranspiration; vegetation productivity; VIP model; climate change