

长江上游流域生长季植被覆盖度时空 变化特征及其成因

杨少康^{1, 2, 3} 刘冀^{1, 2, 3} 魏榕^{1, 2, 3} 董晓华^{1, 2, 3} 林青霞¹ 章程焱^{1, 2, 31}

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北 宜昌 443002;

3. 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430072)

【摘要】: 植被覆盖度是衡量区域植被生长状态及描述生态环境质量的重要指标, 基于 MODISMOD13A3 遥感数据和气象数据, 采用趋势分析法分析长江上游流域生长季植被覆盖度时空变化特征, 进一步采用偏相关分析、残差分析法揭示植被覆盖度变化对气候和人类活动的响应机制。结果表明: (1) 2000~2019 年长江上游流域生长季植被覆盖度呈显著上升趋势 ($P < 0.05$), 增长速率为 $1.3 \times 10^{-3}/a$, 多年平均植被覆盖度为 0.64, 呈东部向西北部逐渐下降趋势; (2) 植被覆盖度空间分布异质性显著, 61.5% 的区域呈改善趋势, 主要为分布在嘉陵江流域及乌江流域的栽培植物, 退化区域占 38.5%, 主要为分布在金沙江流域及岷江上游流域的针叶林、草甸及灌丛; (3) 植被覆盖度以海拔 3.5km 为界, 呈先上升后下降态势, 海拔低于 3.5km, 植被覆盖度变化随海拔变化梯度较小, 海拔高于 3.5km, 植被覆盖度随海拔变化梯度较大; (4) 以降水为植被覆盖度变化主要影响因子的像元面积占 57.5%, 分布多集中在嘉陵江流域及乌江流域, 以气温为主要影响因子分布较分散; (5) 2000~2019 年长江上游流域人类活动对植被覆盖度变化影响力为正值区域高于负值区域, 表明人类活动促进了长江上游流域植被生长。

【关键词】: 植被覆盖度 长江上游 生长季 时空特征 气候变化 人类活动

【中图分类号】: Q948 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)07-1523-11

植被是陆地生态系统的重要组成部分, 作为土壤、水分及环境等因素的自然纽带, 不仅是气候变化的承担者, 同时对气候变化产生反馈作用, 是全球气候变化的“指示器”, 在减缓气候变化方面发挥着重要作用^[1,2,3]。植被覆盖变化常用来表征气候变化影响的程度, 且植被覆盖的变化将直接或间接地影响陆地生态系统、局地气候及区域生态平衡。因此, 植被覆盖与气候变化两者间的影响机制一直是全球气候变化研究中的热点问题^[4,5,6]。

大量研究表明, 全球范围内植被覆盖度呈增强趋势^[7,8], 且在北半球的中高纬度地区表现为显著增强趋势^[9], 在我国不同地区植被覆盖度的研究也有类似结论^[10,11,12,13]。引起植被覆盖度变化的主要原因为气候变化和人类活动, 多数研究将降水和气温作为

作者简介: 杨少康(1998~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水文学及水资源. E-mail: 1002878336@qq.com; 刘冀 E-mail: liuji@ctgu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(52009065); 湖北省自然科学基金项目(2020CFB293)

导致植被覆盖度变化的主要气候因子。马梓策等^[14]分析得出中国地区植被覆盖度与气温呈负相关,与降水呈正相关,降水是影响中国植被覆盖度发生变化的主要气候因子;张志强等^[15]认为降水是影响黄河流域植被覆盖度空间分布的决定性因素;刘明霞等^[16]得出赣江上游流域气温对植被覆盖度的影响强于降水,且气温是影响植被生长的主要气候因子。易雪等^[17]得出辽宁省植被覆盖度在半干旱区与降水呈正相关,与气温呈负相关,而在半湿润区则与降水及气温均呈正相关。总体而言,针对不同尺度的研究区域,与植被覆盖度变化密切相关的气候因子是降水和气温,但两者对植被覆盖度变化的影响机制却因研究区域不同存在差异,因此有必要揭示不同流域不同时空尺度下的影响机制。对于引起植被覆盖度发生变化的另一个重要因素人类活动而言,通过水利工程修建、退耕还林还草、城市化等方式其对植被覆盖度存在着显著正向或负向影响^[18,19,20]。

长江上游流域地理跨度大,地形复杂,不仅受东南季风及西南季风影响,又受“中华水塔”青藏高原的影响,气候条件差异显著,是气候变化的脆弱地区。流域内植被覆盖率高,是整个长江流域的生态屏障,因此关于长江上游流域植被覆盖度的研究引起了人们广泛的关注。国内外众多学者对长江上游流域植被覆盖度已经相继开展了一些研究, Yang 等^[21]和刘扬扬等^[22]利用 MODISNDVI 数据探究了 2001~2010 年长江上游植被时空变化特征,表明长江上游流域植被呈增长趋势;张亮等^[23]揭示了 1980~2015 年整个长江流域植被覆盖变化,同时指出长江上游植被覆盖度呈增长趋势。自国家于 2000 年启动退耕还林还草工程和天然林保护工程,在很大程度上影响了长江上游流域植被覆盖结构的变化,此外,长江上游流域水电站开发建设、城市化进程加剧,导致植被覆盖度近年来受人类活动干扰强烈。针对长江流域植被覆盖度研究大多以年或四季作为统计分析时段,而生长季作为植被生长的重要时期,其计算出的植被覆盖度能更好的指示生态环境的变化,因此,分析生长季植被覆盖度的变化对指导生态保护工作更具参考意义,此外,长江上游作为长江流域水能资源最为富集的区域,揭示长江上游植被覆盖度变化,进一步研究水文过程特别是径流对植被变化的响应机制,有助于为三峡工程等水利工程的调度运行提供决策支持。因此本文采用 MODIS 归一化植被指数 (NDVI) 数据计算植被覆盖度,分析长江上游流域 2000~2019 年生长季 (4~10 月) 植被覆盖度时空变化特征,以期探究气候变化和人类活动对植被覆盖度的影响机制,为长江上游流域生态环境保护提供一定的参考与借鉴。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

长江发源于青藏高原,至湖北宜昌以上为上游流域,总体横跨 6 个省市区,其干流长度为 4500km 左右,上游流域面积达到 $100 \times 10^4 \text{ km}^2$,介于 $24^\circ 46' \text{ N} \sim 35^\circ 91' \text{ N}$, $90^\circ 47' \text{ E} \sim 113^\circ 31' \text{ E}$ 。流域地理位置如图 1 所示,流域内水系众多,包括金沙江、雅砻江、岷江、嘉陵江、乌江等著名河流。流域内海拔自东南向西北递增,地跨我国第一、二级阶梯,流域地处欧亚大陆副热带东部边缘,具备鲜明的东亚副热带气候特征,其东部地区为北亚热带季风和中亚热带湿润季风气候,西北部为山地高原气候,横断山地属于亚热带高原季风气候。气候差异明显,流域多年平均气温为 11.4°C ,平均气温自东南向西北递减,多年平均累计降水量为 907.1mm,降水主要集中在夏季。复杂的地貌及气候条件影响着流域植被状况,长江上游流域植被类型如图 2 所示,流域植被类型主要是栽培植被、灌丛、草甸及针叶林,分别占 24.1%、21.5%、20%及 14.9%。

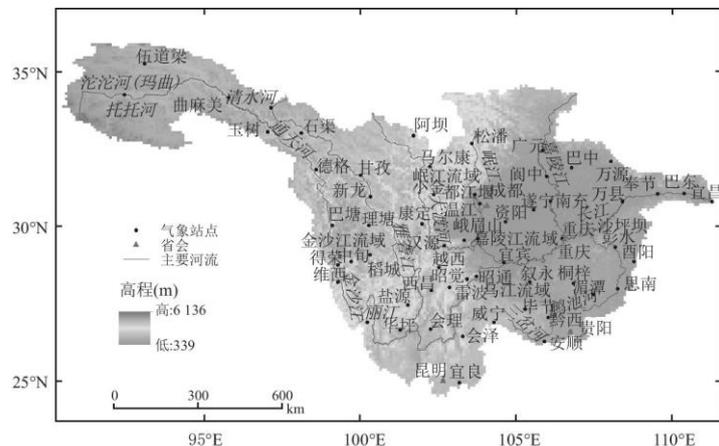


图 1 长江上游流域地理位置及气象站点分布

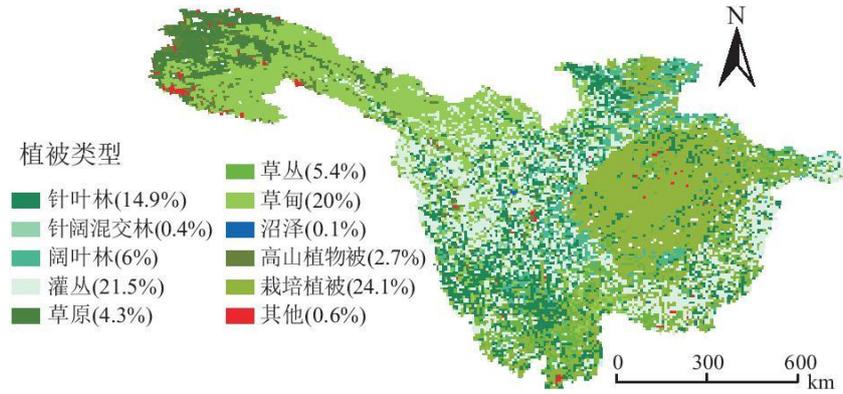


图 2 长江上游流域植被类型分布图

1.2 数据来源

本研究选用美国国家航空航天局 (<https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appears/>) 提供的 2000~2019 年 MODISMOD13A3 数据, 其空间分辨率为 1km, 时间分辨率为月。植被类型数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>) 提供的中国 1:100 万空间分布数据, 空间分辨率为 1km。考虑到长江上游流域面积较大, 为方便计算, 利用 ArcGIS 重采样工具将 MOD13A3 数据及植被类型数据处理为 8km。降水和气温数据来自中国气象科学数据共享服务网 (<https://data.cma.cn/>), 其数据经过严格的三性检验, 考虑过极端值和逻辑检验等, 考虑到气象站搬迁以及气象数据的稳定及可靠性, 剔除数据缺测较多的站点, 对于少数缺测月采用邻近站进行空间插补, 最终选取流域内气象站点 63 个。

2 研究方法

2.1 植被覆盖度计算

归一化植被指数 (NDVI) 一般用来指示植被的生长状态, 并与植被覆盖度之间存在显著线性关系, 因此可利用 NDVI 来计算植被覆盖度^[15]。在计算植被覆盖度的方法中, 像元二分模型被认为是最简单的线性光谱模型^[24]。因此本文基于 NDVI, 运用像元二分模型计算长江上游流域生长季植被覆盖度, 具体计算公式如下:

$$C_i = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \quad (1)$$

式中: C_i 是像元植被覆盖度; $NDVI_s$ 是由裸地覆盖部分的 NDVI 值; $NDVI_v$ 是由植被覆盖部分的 NDVI 值。目前常用的研究方法为根据已有经验, 将 $NDVI_s$ 及 $NDVI_v$ 取为定值; 或者是以研究区域的 0.5% 置信度取 NDVI 的上下限阈值代表 $NDVI_s$ 及 $NDVI_v$ 。结合长江上游流域植被覆盖现状, $NDVI_s$ 及 $NDVI_v$ 分别取累计频率为 99.5% 及 0.5% 时对应的 NDVI 值^[23]。

2.2 偏相关分析

本文采用偏相关分析法分别研究植被覆盖度与降水及气温之间的相关关系, 该法在计算时, 可以不考虑其他要素的影响, 单

独研究两个要素之间的相关关系^[25]。偏相关系数计算如下：

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (2)$$

式中： r_{xy} 、 r_{xz} 、 r_{yz} 分别代表 x 与 y 、 x 与 z 、 y 与 z 之间的线性相关系数； $r_{xy,z}$ 表示将 z 固定后， x 与 y 之间的相关系数。本文 x 代表植被覆盖度， y 代表降水， z 代表气温。采用 t 检验对偏相关系数进行显著性检验，计算公式如下：

$$t = \frac{r_{xy,z}}{\sqrt{1-r_{xy,z}^2}} \sqrt{n-m-1} \quad (3)$$

式中： $r_{xy,z}$ 表示将 z 固定后； x 与 y 之间的相关系数； n 为样本数； m 为自变量个数。

2.3 梯度距离平方反比法

本文采用梯度距离平方反比法对降水和气温进行插值，处理后的降水和气温空间分辨率为 8km。该法考虑了经纬度和海拔对气象要素的影响^[26]，具体计算如下：

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^m \left(\frac{Z_i + (X - X_i) \times C_x + (Y - Y_i) \times C_y + (U - U_i) \times C_u}{d_i^2} \right)}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{d_i^2}} \quad (4)$$

式中： Z 为待插像元的估算值； Z_i 为第 i 个气象站点的实测值； d_i 为第 i 个气象站点与待插像元之间的距离； m 为气象站点的个数； X 、 Y 、 U 分别代表待插像元的经度、纬度及海拔； X_i 、 Y_i 、 U_i 分别为第 i 个气象站点的经度、纬度及海拔高度； C_x 、 C_y 、 C_u 分别代表各气象站点气象要素与经度、纬度及海拔之间的偏相关系数。

2.4 残差分析

为分析人类活动对长江上游流域生长季植被覆盖度的影响，本文采用残差分析进行计算，该法利用多元线性回归模型拟合出受降水与气温影响的植被覆盖度，进而计算出实际植被覆盖度与预测植被覆盖度之间的差值^[27]，具体计算如下：

$$\varepsilon = C_{real} - C_{pre} \quad (5)$$

式中： ε 为残差； C_{real} 表示实际植被覆盖度值； C_{pre} 表示预测植被覆盖度值。当 $\varepsilon > 0$ 时，说明人类活动对植被覆盖度的增加产生积极影响，反之则说明人类活动对植被覆盖度产生负面影响。

3 结果分析

3.1 植被覆盖时空变化特征

3.1.1 植被覆盖度时间变化特征

长江上游流域年际生长季植被覆盖度变化趋势如图3所示,由图3可知,2000~2019年长江上游流域生长季植被覆盖度总体呈显著波动增长趋势,增长速率为 $1.3 \times 10^{-3}/a$ ($P < 0.05$)。多年植被覆盖度均值为0.64,其中,植被覆盖度最大值出现在2019年,其值为0.66,最小值为0.62,出现在2001年。流域植被覆盖度经历了两次突增情况,第一次为2001~2002年,植被覆盖度由0.62增长到0.64,第二次为2007~2008年,植被覆盖度由0.63增加到0.65。前者部分原因是由于我国天然林保护工程实施及退耕还林工程的实施,这两项工程于2001年全面启动,并均集中于长江上游地区^[28]。针对2007~2008年植被覆盖度突增情况,可能原因为天然林保护工程实施及退耕还林工程中的人造林不断生长,进而有效提高了植被覆盖度。2011~2015年,长江上游植被覆盖度呈现逐年上升趋势,但2016~2018年,植被覆盖度却表现为逐年缓慢下降趋势,主要是由于2010~2015年处于我国第一轮退耕还林阶段末期,之后部分地区出现复耕现象,导致植被覆盖度有所下降^[29]。针对2019年植被覆盖度达到最大值,原因可能与2018年召开的第二次长江经济带发展座谈会上提出的全面做好长江生态环境保护与修复工作有关,此次会议的召开使长江流域兴起“共抓大保护、不搞大开发”的生态保护工作热潮^[30]。将长江上游流域生长季降水及气温进行归一化得到其年际变化趋势图,由图3可知,降水和气温均呈上升趋势,说明长江上游流域生长季植被覆盖度在良好的水热关系下呈增长趋势,但植被覆盖度与降水及气温变化并无显著相关关系,表明植被覆盖度的变化受降水与气温共同作用及其他因素的共同影响。

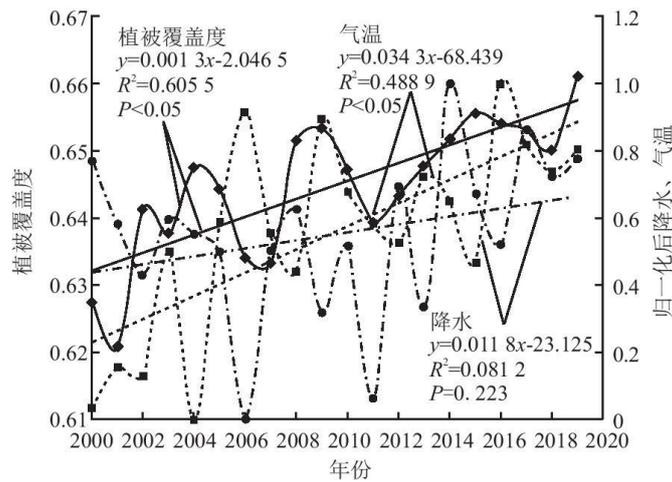


图3 长江上游流域生长季植被覆盖度、降水及气温年际变化特征

3.1.2 植被覆盖度空间分布特征

长江上游流域生长季植被覆盖度空间变化如图4所示,由图4(a)可知,流域植被覆盖度呈现由东部向西北部地区下降趋势,高植被覆盖度主要分布在乌江流域。金沙江上游流域植被覆盖度最低。由图4(b)~4(c)可知,2000~2019年长江上游流域生长季植被覆盖度整体呈现改善趋势,改善区域占长江上游流域总面积的61.5%,其中7.9%的区域呈现显著改善趋势($P < 0.05$),53.6%的区域呈现不显著改善趋势($P < 0.05$),呈现改善的地区主要分布在嘉陵江流域及乌江流域。38.5%的区域植被覆盖度呈现退化趋势,其中4.3%呈现显著退化趋势($P < 0.05$),34.2%呈现不显著退化趋势($P < 0.05$),呈现退化的区域主要分布在金沙江流域及岷江上游流域,金沙江中上游流域气候干旱,地势陡峭,导致植被覆盖度较低,下游主要为城镇和耕种区,受人类活动影响较大,因此其植被覆盖度呈退化趋势^[31]。岷江上游流域由于对自然资源的不合理开发及保护工程设施不够及时与完备,加上人类活动频繁,这是造成岷江上游流域植被覆盖度呈退化的主要因素^[32]。从不同植被类型来看,栽培植物主要分布在嘉陵江流域,主要呈现不显著改善趋势($P < 0.05$),针叶林在金沙江流域及岷江流域呈现不显著退化趋势($P < 0.05$),在乌江流域呈现不显著改善趋势($P < 0.05$),

草甸主要分布在金沙江流域中上游及岷江流域上游，主要呈现不显著退化趋势($P < 0.05$)，灌丛分布较为分散，各流域均有分布，在乌江流域呈现不显著改善趋势($P < 0.05$)，其余大部分流域呈不显著退化趋势($P < 0.05$)。总体而言，因为长江上游流域是我国水电站开发的重点区域，大量水库的修建及植被恢复和保护措施的实施使得整体植被覆盖度呈现改善趋势^[33]。

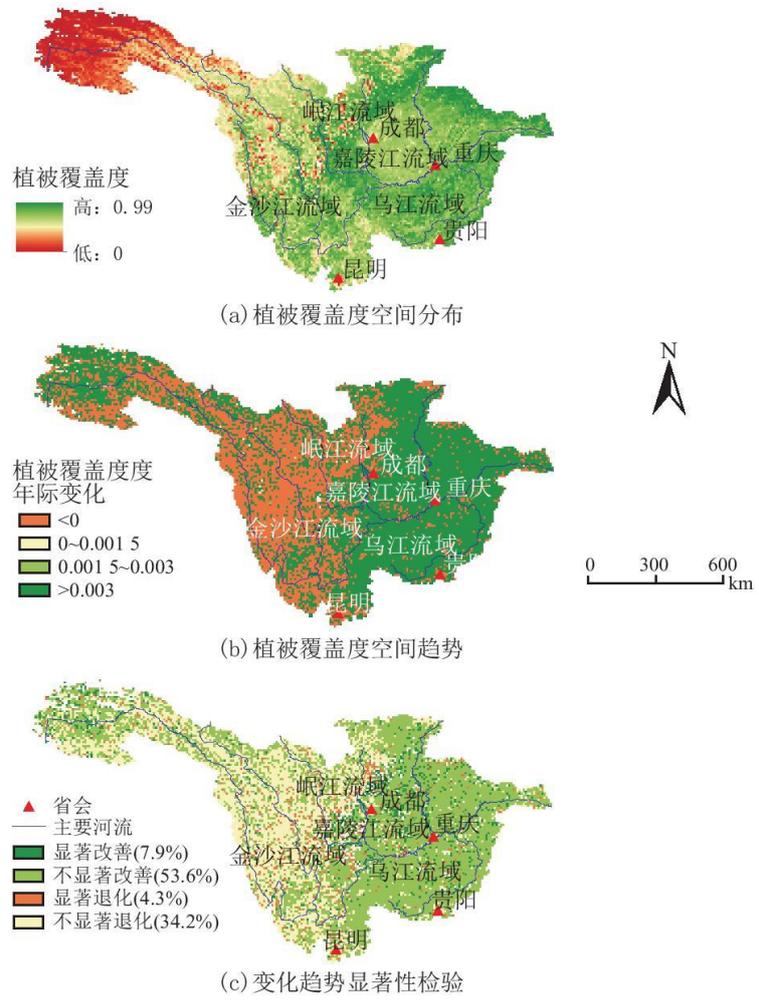


图 4 长江上游流域多年平均生长季植被覆盖度及变化趋势空间分布

植被生长受到多种因素影响，包括气候、地形及人类活动都会对植被生长和空间分布产生影响^[34]。长江上游流域生长季植被覆盖度、气温及降水随海拔变化趋势如图 5 所示，由图 5 可知，长江上游流域生长季植被覆盖度随海拔升高呈先上升后下降的趋势，在海拔低于 3.5km 时，植被覆盖度呈现增加趋势，植被覆盖度最大值出现在 1.2km 左右，其值为 0.85。海拔高于 3.5km 的地区植被覆盖度呈下降趋势。降水及气温随着海拔的升高整体均呈下降趋势，降水最大值为 136.4mm，出现在海拔 0.7km 左右，气温在海拔 0.6km 出现最大值 22.4℃。结合长江上游流域的地形特征，按<1.5、1.5~2.5、2.5~3.5、3.5~4.5 及>4.5km 划分为五个海拔区间，不同区间植被覆盖度垂直分布特征如表 1 所示，由表 1 可知，海拔低于 1.5km 时，植被覆盖度均值最高，达到 0.80，该海拔区间面积占比为 30.4%，降水及平均气温也最大，分别为 133.3mm 及 20.2℃；海拔处于 1.5~3.5km，时植被覆盖度变化不大，均值为 0.76 左右，降水及气温呈下降趋势，分别由 122.2mm 降到 109.4mm、19.6℃降为 15.2℃；在海拔低于 3.5km 时，针叶林是其主要植被类型。当海拔处于 3.5~4.5km 时，长江上游流域植被覆盖度呈下降趋势，均值为 0.62，主要植被类型由针叶林过渡到灌丛；当海拔高于 4.5km 时，该海拔区间面积占比为 19.5%，流域植被覆盖度下降迅速，均值为 0.14，降水及气温达到最小值，分别为 51.6mm 及 6.8℃，主要植被类型由灌丛演变为草原。

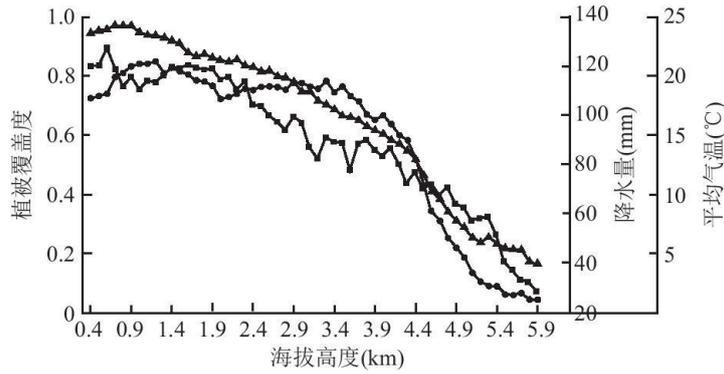


图 5 长江上游流域生长季植被覆盖度、降水、气温随海拔变化趋势

表 1 长江上游流域植被覆盖度垂直分布特征

海拔高度 (km)	<1.5	1.5~2.5	2.5~3.5	3.5~4.5	>4.5
植被覆盖度均值	0.80	0.76	0.76	0.62	0.14
降水均值 (mm)	133.3	122.2	109.4	90.1	51.6
气温均值 (°C)	20.2	19.6	15.2	12.8	6.8
面积占比 (%)	34.4	16.0	9.7	20.4	19.5
主要植被类型	针叶林	针叶林	针叶林	针叶林、灌丛	灌丛、草原

3.2 植被覆盖变化的驱动分析

3.2.1 气候要素对植被覆盖度的影响

为分析长江上游流域生长季植被覆盖度受气候要素的影响,利用偏相关法分析降水、气温与植被覆盖度之间的关系。长江上游流域生长季植被覆盖度与降水、气温偏相关系数及其显著性空间分布如图 6 所示,由图 6(a)~6(b)可知,降水与植被覆盖度的偏相关系数为-0.74~0.89,均值为 0.07,其中,降水与植被覆盖度偏相关系数为正值像元面积占长江上游流域面积的 70.9%,其中呈显著正相关的像元面积占 20.9%($P<0.05$),主要分布在乌江流域及嘉陵江流域下游地区,呈不显著正相关像元面积占 50%($P<0.05$),在长江上游流域各区均有分布,较为分散;降水与植被覆盖度偏相关系数为负值的像元面积占 29.1%,其中呈显著负相关像元面积占 1.3%($P<0.05$),不显著负相关像元面积占 27.8%($P<0.05$),主要分布在金沙江流域及岷江流域。由图 6(c)~6(d)可知,气温与植被覆盖度偏相关系数为-0.84~0.83,均值为 0.02,其中偏相关系数为正值的像元面积占长江上游流域总面积的 59.6%,其中呈显著正相关的像元面积占 8.5%($P<0.05$),主要分布在乌江流域上游,呈不显著正相关像元面积占 51.1%($P<0.05$),除金沙江流域中下游区域外,其他各区均有分布;气温与植被覆盖度偏相关系数为负值的像元面积占 40.4%,其中呈显著负相关像元面积为 5.1%($P<0.05$),呈不显著负相关像元面积为 35.3%($P<0.05$),主要分布在金沙江流域中下游、岷江流域上游及嘉陵江流域下游。根据研究表明,长江上游流域降水、气温呈增加趋势,较好的光热条件、水热条件使得长江上游流域生长季植被覆盖度呈上升趋势^[35]。

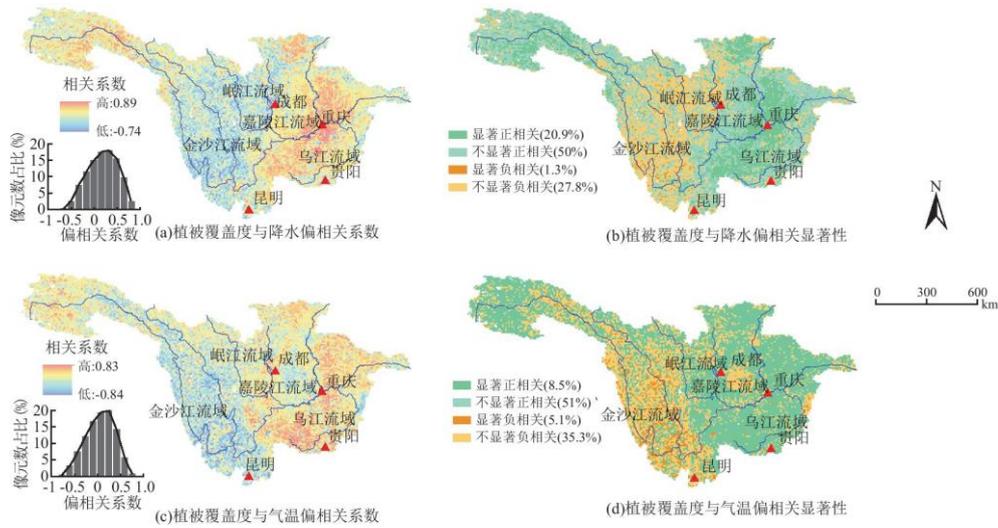


图6 长江上游流域生长季植被覆盖度与降水、气温偏相关系数及其显著性空间分布

为分析降水及气温对长江上游流域生长季植被覆盖度的影响程度，比较像元植被覆盖度与气象因子(降水与气温)的偏相关系数，取绝对值最大者相应的气象因子作为该像元的主要影响因子，并称该气象因子为主导气象因子。2000~2019年长江上游生长季植被覆盖度主要影响因子空间分布如图7所示，由图7可知，以降水为主导气象因子的像元占长江上游流域总面积的57.5%，主要分布在嘉陵江流域及乌江流域。以气温为主导气象因子的像元占长江上游流域总面积的42.5%，分布较为分散。

3.2.2 人类活动对植被覆盖度的影响

植被覆盖变化是人类活动及气候共同作用的结果，本文使用残差分析法分析人类活动对长江上游流域植被覆盖度的影响，长江上游流域残差分析如图8所示，残差为正表示人类活动对植被覆盖度具有正向作用，残差为负具有反向作用，由图8可知，2000~2019年长江上游流域人类活动对植被覆盖度影响正值像元面积占总流域面积79.8%，负值像元面积占总流域面积20.2%，负值像元主要分布在金沙江上游区域及嘉陵江流域及乌江流域部分地区，嘉陵江下游残差为负的原因在于下游流域包括重庆市，城市扩张和人类剧烈活动导致了植被覆盖度的下降^[36]，加上人口居住量的不断增多，导致土地出现紧缺现象，且由于当地人生态保护意识不足，存在土地利用不当，盲目破坏植被现象，进而导致嘉陵江下游流域人类活动对植被覆盖度变化产生反向作用^[37]。金沙江上游由于人类活动日益增强，但流域生态环境较为脆弱，导致人类活动对植被覆盖度的变化产生反向作用^[38]。整体而言，人类活动促进了长江上游流域植被生长。

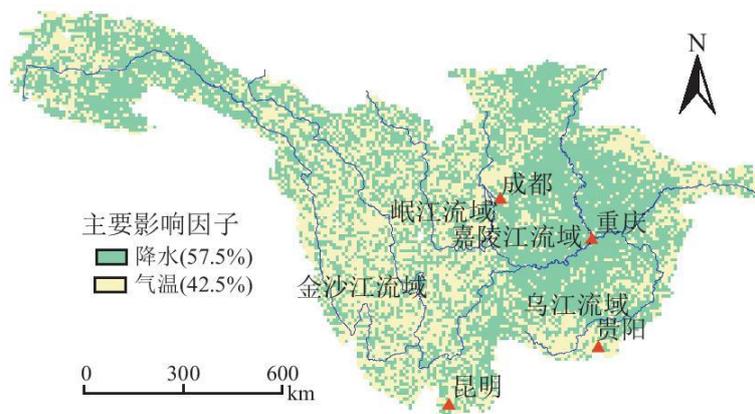


图 7 长江上游流域生长季植被覆盖度主要影响因子空间分布

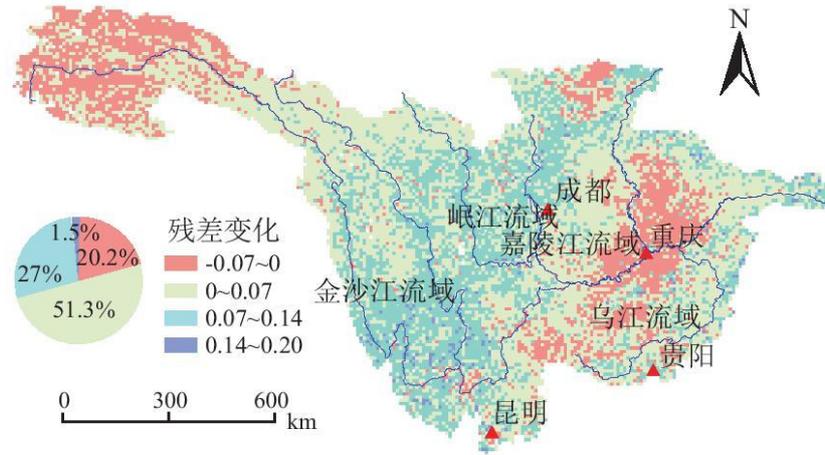


图 8 长江上游流域植被覆盖度残差分析

4 讨论

植被覆盖变化受人类活动和气候要素两者共同的影响，本文利用遥感数据结合气象数据从宏观尺度上揭示了长江上游流域 2000~2019 年生长季植被覆盖度对人类活动及气候变化的响应。结果表明长江上游流域生长季植被覆盖度整体呈增长趋势，且在空间上植被覆盖度自东部向西北部递减态势，研究结果可对长江上游生态环境保护提供参考。然而本文考虑到长江上游流域面积达 100 万 km^2 ，面积较大，为方便计算将遥感数据重采样至 8km，在一定程度上有助于获得研究区域整体植被覆盖度分布规律，却概化了小尺度区域的植被覆盖度变化。另外本文在考虑气候要素对植被覆盖度的影响时，仅选择了降水与气温这两种密切相关因子，但空气相对湿度、太阳辐射等因子也是影响植被覆盖度的气象因子。阿依努·吐逊等^[39]认为植被变化与潜在蒸散之间存在显著正相关关系，提出研究潜在蒸散对流域植被及生态环境问题具有重要的现实意义。刘静等^[40]研究认为湿度的变化会影响植被生长的耐受限度。陆晴等^[41]研究认为中亚地区植被覆盖度与极端降水指数呈显著正相关。刘家茹等^[42]认为植被覆盖与干旱存在一定的响应关系。因此，在后续研究中，可尝试使用高分辨率的遥感数据，并选取更多气象与人类活动因子，以探究精细尺度下的植被覆盖度变化规律及影响机制。

长江上游流域由于受生态恢复及生态保护工程的影响，整体上的植被覆盖度呈现上升趋势，但农田、耕地及建设用地等处于动态变化过程中，而这些变化在一定程度上会对植被覆盖度的计算产生影响，且存在局部地区气候急剧变化及人类活动加剧导致植被退化的现象，所以后续研究还需要结合土地利用类型、气候要素、人类活动来深入研究这三者对植被覆盖度的影响机制，仅利用多元线性回归模型拟合植被覆盖度与降水、气温的线性关系，采用残差分析法简单量化人类活动对植被覆盖的影响是不全面的，因此提出量化气候变化及人类活动对植被覆盖度变化的贡献的方法，以期从多角度分析长江上游植被覆盖度变化的原因，更好的为长江上游流域的生态环境保护提供重要参考，此项研究仍充满挑战。

5 结论

本文基于 2000~2019 年 MODISNDVI 和降水、气温数据，揭示了长江上游流域生长季近 20a 植被覆盖度的时空变化特征，并分析了降水、气温及人类活动对植被覆盖度的影响。结论如下：

- (1) 2000~2019 年长江上游流域生长季植被覆盖度呈显著上升趋势 ($P < 0.05$)，增长速率为 $1.3 \times 10^{-3}/\text{a}$ ，植被覆盖度经历了

2001~2002 和 2007~2008 年两次突增。流域多年植被覆盖度均值为 0.64, 呈现自东部向西北部递减态势。

(2) 长江上游流域各子流域生长季植被覆盖度空间变化差异显著, 整体呈现改善趋势, 改善区域占总面积 61.5%, 主要为分布在嘉陵江流域及乌江流域的栽培植物, 38.5%的流域植被呈现退化趋势, 主要为分布在金沙江流域及岷江上游流域的针叶林、草甸及灌丛。

(3) 长江上游流域生长季植被覆盖度以海拔 3.5km 为界, 呈先上升后下降趋势, 流域平均降水、平均气温均随海拔升高而呈下降趋势, 植被覆盖度均值由 0.8 下降至 0.14 左右。海拔 3.5km 以下植被覆盖度随海拔梯度变化较小, 高于海拔 3.5km, 随海拔升高植被覆盖度下降梯度较大。

(4) 长江上游流域植被覆盖度变化主要受降水与气温影响, 其中以降水为主导气象因子的植被面积占 57.5%, 分布多集中在嘉陵江流域及乌江流域。以气温为主导气象因子的植被面积占 42.5%, 整体分布较为分散。

(5) 2000~2019 年长江上游流域人类活动对植被覆盖度变化起正向作用的像元面积高于起负向作用的像元面积, 人类活动整体上促进了长江上游流域植被生长。

参考文献:

[1] MAHMOOD R, PIELKE SR R A, HUBBARD K G, et al. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(4):929-953.

[2] WANG J, WANG K, ZHANG M, et al. Impacts of climate change and human activities on vegetation cover in hilly southern China[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 81:451-461.

[3] SUN Y L, SHAN M, PEI X R, et al. Assessment of the impacts of climate change and human activities on vegetation cover change in the Haihe River basin, China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2020, 115:102834.

[4] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000-2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. *地理学报*, 2015, 70(5):705-716.

[5] 孟浩斌, 周启刚, 李明慧, 等. 基于 MODIS 像元尺度的三峡库区植被覆盖度变化的地形分布特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(8):1790-1799.

[6] 童珊, 曹广超, 曹生奎. 近 34 年祁连山南坡植被覆盖变化与气象因子关系研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(12):2655-2664.

[7] EASTMAN J R, SANGERMANO F, MACHADO E A, et al. Global trends in seasonality of normalized difference vegetation index (NDVI), 1982-2011[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(10):4799-4818.

[8] PIAO S, WANG X, PARK T, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(1):14-27.

[9] 杨雪梅, 杨太保, 刘海猛, 等. 气候变暖背景下近 30a 北半球植被变化研究综述[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(2):379-391.

-
- [10]高江波,焦珂伟,吴绍洪. 1982-2013年中国植被 NDVI 空间异质性的气候影响分析[J]. 地理学报, 2019, 74(3):534-543.
- [11]刘宪锋,任志远. 西北地区植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J]. 中国农业科学, 2012, 45(10):1954-1963.
- [12]刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等. 1982-2012年中国植被覆盖时空变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(16):5331-5342.
- [13]刘正佳,邵全琴. 三江源地区植被覆盖度变化及其与气候因子的关系[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6):334-339.
- [14]马梓策,于红博,曹聪明,等. 中国植被覆盖度时空特征及其影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(6):1310-1321.
- [15]张志强,刘欢,左其亭,等. 2000-2019年黄河流域植被覆盖度时空变化[J]. 资源科学, 2021, 43(4):849-858.
- [16]刘明霞,刘友存,陈明,等. 2000-2018年赣江上游植被覆盖度时空演化及其对气候变化的响应[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5):284-290.
- [17]易雪,杨森,刘鸣彦,等. 辽宁省植被覆盖度时空变化特征及其对气候变化的响应[J]. 干旱气象, 2021, 39(2):252-261.
- [18]艾克热木·热合曼. 焉耆盆地主要分水枢纽工程对植被覆盖变化的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学, 2017.
- [19]吕平毓,严开勇. 基于遥感的四面山林区植被覆盖度动态监测[J]. 人民长江, 2014, 45(19):77-80.
- [20]宋鑫,李微,刘洪洋,等. 大连市河岸带植被覆盖度监测[J]. 地理空间信息, 2019, 17(12):91-93, 120, 10-11.
- [21]YANG J, DING Y, CHEN R. Spatial and temporal of variations of alpine vegetation cover in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers of the Tibetan Plateau from 1982 to 2001[J]. Environmental Geology, 2006, 50(3):313-322.
- [22]刘扬扬,刘伯娟. 2001~2010年长江上游植被时空变化特征分析[J]. 人民长江, 2014, 45(17):18-22.
- [23]张亮,丁明军,张华敏,等. 1982-2015年长江流域植被覆盖度时空变化分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(12):2084-2097.
- [24]张成才,姜洋,李颖,等. 基于像元二分模型的伏牛山地区植被覆盖度变化[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3):301-307.
- [25]崔珍珍,马超,陈登魁. 1982-2015年科尔沁沙地植被时空变化及气候响应[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2):536-544.
- [26]NALDER I A, WEIN R W. Spatial interpolation of climatic normals: Test of a new method in the Canadian boreal forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 92(4):211-225.
- [27]屈莹波,赵媛媛,丁国栋,等. 气候变化和人类活动对锡林郭勒草原植被覆盖度的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3):802-811.
- [28]胡晓曦,第宝锋,袁媛,等. 长江上游生态建设工程与植被覆盖时空变化的响应特征研究[J]. 长江流域资源与环境,

2016, 25 (8) :1264-1272.

[29]刘祖英, 王兵, 赵雨森, 等. 长江中上游地区退耕还林成效监测与评价[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8) :2463-2469.

[30]习近平. 在深入推动长江经济带发展座谈会上的讲话[J]. 社会主义论坛, 2019(10) :5-9.

[31]张顾萍, 陈国民, 邵怀勇, 等. 近 16 年金沙江流域植被覆盖时空特征及其对气候的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(7) :1638-1648.

[32]陈财, 杨斌, 李丹, 等. 岷江上游流域植被覆盖度时空变化分析[J]. 西南科技大学学报, 2019, 34(1) :13-19.

[33]刘宇, 朱源. 20 世纪 80 年代以来长江流域植被变化的速度和格局[J]. 三峡生态环境监测, 2016, 1(2) :39-43.

[34]李薇, 谈明洪. 太行山区不同坡度 NDVI 变化趋势差异分析[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4) :509-519.

[35]时光训. 1970-2014 年长江流域气候变化的时空特征分析[D]. 南昌: 江西师范大学, 2016.

[36]张婷, 薛东剑, 段金亮, 等. 2000~2019 嘉陵江流域植被覆盖时空变化特征及气候响应分析[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(5) :1110-1120.

[37]潘学锐, 隆建, 徐旻祎. 嘉陵江中下游水土流失成因与防治措施[J]. 农业工程技术, 2018, 38(2) :28.

[38]刘婷婷. 金沙江上游流域生态承载力及人与生态系统关系研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.

[39]阿依努·吐逊, 张青青, 徐海量, 等. 基于 NDVI 科克苏湿地蒸散量时空变化特征分析[J]. 西南农业学报, 2021, 34(3) :647-653.

[40]刘静, 温仲明, 刚成诚. 黄土高原不同植被覆被类型 NDVI 对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(2) :678-691.

[41]陆晴, 刘根林, 闫冰, 等. 气候变暖背景下中亚地区极端降水事件变化及其对植被覆盖的影响[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4) :226-235, 243.

[42]刘佳茹, 赵军, 王建邦. 2001-2016 年祁连山地区植被覆盖度对干旱的响应[J]. 草业科学, 2021, 38(3) :419-431.