

# 基于气候情景的岩溶断陷盆地 2020—2050 年 植被动态变化模拟预测

李 丹<sup>1,2)</sup>, 庄义琳<sup>3)</sup>, 吴秀芹<sup>1,2)\*</sup>

1)北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2)北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083;  
3)浙江省环境科技有限公司, 浙江杭州 310000

**摘 要:** 岩溶断陷盆地作为我国西南部重要生态脆弱区和生态安全屏障区, 生态价值不可估量。其独特的植被生态系统对气候变化十分敏感, 探讨在未来全球变暖的必然趋势下断陷盆地植被变化趋势, 能为进一步了解岩溶断陷盆地植被变化的气候驱动机制提供了重要依据。本研究基于 2001—2016 年间气象数据集和 NDVI 时间序列数据, 利用 TS 非参数趋势分析法对未来 2020—2050 年两种 RCPs(Representative Concentration Pathways)未来气候情景下的 NDVI 值进行预测, 开展了不同气候变化背景下断陷盆地未来植被的可能演变趋势分析。结果表明: 相对于基准期(2001—2016 年), 在不同典型浓度路径(RCP4.5 和 RCP8.5)情景下, 断陷盆地气候整体呈持续增温增湿趋势, 且植被 NDVI 也有一定的升高。综合分析两种情景下的 NDVI 变化共性趋势发现: 青藏高原东南缘木里河谷地区温度和降水量升高缓慢, 区域性干旱增强, 植被出现退化, 是未来断陷盆地植被修复的难点地区; 而云贵两省边界地区温度和降水涨幅迅速, 未来植被改善明显, 是植被修复成果的重点保护区。

**关键词:** RCPs; NDVI; 岩溶; 断陷盆地

中图分类号: TP79; Q948 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.082901

## Simulation and Prediction of Vegetation Dynamics in the Karst Faulted Basin from 2020 to 2050 in Climate Scenarios

LI Dan<sup>1,2)</sup>, ZHUANG Yi-lin<sup>3)</sup>, WU Xiu-qin<sup>1,2)\*</sup>

1) College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;  
2) Key Laboratory of Soil and Water Conservation of State Forestry Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083;  
3) Zhejiang Environmental Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000

**Abstract:** As an important ecologically fragile area and an ecological security barrier area in southwestern China, the karst faulted basin has immeasurable ecological value. The unique vegetation ecosystem in the karst faulted basin is very sensitive to climate change. So, discussing the trend of vegetation changes under the inevitable trend of the future global warming can provide an important basis of the climate driving mechanism of vegetation changes to develop further understanding in karst faulted basins. Based on the meteorological dataset and NDVI time series data from 2001 to 2016, this study used Theil Sen Median analysis method to predict two RCPs scenarios' NDVI from 2020 to 2050, and analyzed the future vegetation evolution law in the study area under different climate changes scenarios. The results show that, relative to the baseline period (2001–2016), under the RCP4.5 (Representative Concentration Pathways) and RCP8.5 scenarios, the climate in the faulted basin continues to increase in temperature and humidity, and the vegetation NDVI also increases to a certain extent. Analyzing the common trends of NDVI changes under two climate scenarios, the authors found that the temperature and precipitation in the Muli River Valley on the southeastern margin of the Tibetan Plateau increase slowly, the

本文由国家重点研发计划(编号: 2016YFC0502500; 2016YFC0502506)和国家自然科学基金项目(41671080)联合资助。

收稿日期: 2020-06-22; 改回日期: 2020-08-25; 网络首发日期: 2020-09-01。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 李丹, 女, 1994 年生。硕士研究生。主要从事 3S 技术在生态环境中的应用研究。E-mail: 13121666483@qq.com。

\*通讯作者: 吴秀芹, 女, 1974 年生。博士, 教授。主要从事 3S 应用, 人地耦合机制、土地利用变化等研究。E-mail: wuxq@bjfu.edu.cn。

regional drought risk increases, and the vegetation begins to degrade, suggesting that it is a difficult area for vegetation restoration in the future. The temperature and precipitation in the border area between Yunnan and Guizhou provinces are both rising rapidly, and the vegetation will greatly improve in the future. It is a key protection area to prevent vegetation degradation.

**Key words:** RCPs; NDVI; karst; faulted basins

全球气候变暖正在成为现实,这将会对陆地生态系统的结构和功能产生影响,并且改变其原有的发展进程(Friend et al., 2014; 郭灵辉等, 2016; 霍晓英等, 2018)。植被作为陆地生态系统的主体,对气候变化和陆地生态系统结构变化起到一定的指示作用,同时植被变化也将反作用于气候(Pettorelli et al., 2005; 刘宪锋等, 2013, 2015)。如今在全球气候变暖背景下,气候变化和植被的关系研究受到广泛关注(Julien et al., 2006; Pang et al., 2017),了解植被动态及其对气候变化的响应对于揭示陆地生态系统行为机制,预测未来植被的增长并从而指导环境管理非常重要(Zhao et al., 2020)。相对历史植被变化及其对气候响应关系的研究(Luo et al., 2020; Zhu et al., 2020),未来植被趋势变化在全球气候变化背景下的研究成为了新的热点(Swain et al., 2017; Zheng et al., 2017; Zhou et al., 2020),国内外学者广泛开展了基于hurst指数(Peng et al., 2012; 潘颖等, 2018)、BP神经网络(何宝忠等, 2016)等对未来的植被趋势预测研究,但只是根据历史植被变化的趋势去预测未来,没有考虑到降水、气温等气候条件的影响。探讨植被变化和气候因子变化的关系,建立二者之间的关系模型,将为探讨植被生态系统对未来气候变化的反馈作用提供有效方法(Swain et al., 2017)。

断陷盆地位于珠江和长江中上游,盆地内缺水严重,而地下河深埋,其周边山区是石漠化发生的主要地貌部位,由于生产力水平低下,人地矛盾突出,严重束缚了区域性经济的可持续发展(曹建华等, 2016)。自2008年实施石漠化综合治理以来,该地区的重度石漠化面积逐渐缩小,林草覆盖率得到了提升。断陷盆地作为我国石漠化综合治理重要类型区,是中国西南部重要生态屏障区,具有石漠化防治、保护生物多样性、固土保水等重要的生态功能(吴协保等, 2009; Tong et al., 2017; 史晨璐和吴秀芹, 2020),因此开展区域气候变化对断陷盆地植被的影响对巩固石漠化治理的成效的研究具有重要意义。归一化植被指数(NDVI)作为量化植被生产力水平的重要指标,被广泛应用于植被生产力评估、生态环境监测、生态脆弱性评价、农田管理、荒漠化调查等方面(Zhang et al., 2012; Cai et al., 2015; Kumar et al., 2020)。联合国政府间气候变化专门委

员会第五次评估报告根据2100年不同的辐射强迫值提出了未来气候变化情景,表示2100年辐射强度将会上升 $2.6 \text{ W/m}^2$ 、 $4.5 \text{ W/m}^2$ 、 $6.0 \text{ W/m}^2$ 、 $8.5 \text{ W/m}^2$ ,其中RCP4.5和RCP8.5代表未来中国发展可能形成的中端稳定排放路径和高排放路径常用于未来气候变化及其响应等相关研究(王绍武等, 2012; 杨辰等, 2018; 周桐宇等, 2018)。本研究以岩溶断陷盆地区为研究对象,基于2001—2016年间气象数据集与NDVI时间序列数据,建立NDVI与降水量和气温因子的多元回归线性方程,并根据未来气候情景下中低温室气体排放(RCP4.5)和高温室气体排放(RCP8.5)降水和温度的预估数据对未来2020—2050年间NDVI值进行模拟。探讨该区域2020—2050年间气候的变化特征,以及植被的时空特征及其对气候变化的响应,以期对未来全球气候变化情景下断陷盆地石漠化综合治理中林草植被的恢复和保护制定应对方案。

## 1 研究区概况

断陷盆地位于云贵高原,介于 $100^{\circ}03'$ — $105^{\circ}10'E$ 和 $22^{\circ}39'$ — $29^{\circ}10'N$ 之间,横跨云南、四川和贵州三省共43个区县(图1),总面积达 $11.04 \text{ 万 km}^2$ 。断陷盆地总体地势呈西北高,东南低,主要包含三种地貌类型,盆地、山地和坡地。受印度洋西南暖湿气流影响,研究区干湿两季分明且季节性干旱严重。断陷盆地四周多为断块山地,盆地内部地形较为平坦,周边山区及斜坡地带是石漠化发生的主要地貌部位(王宇, 1993; 彭淑惠等, 2008; 曹建华等, 2016; 王宇等, 2017)。断陷盆地石漠化面积为 $2.41 \text{ 万 km}^2$ ,占总面积的21.83%。断陷盆地内土壤以红壤为主,另外还有棕壤、石灰(岩)土、紫色土、黑毡土、黄壤等类型。北部属于长江流域的金沙江水系,主要河流包括普隆河、雅砻江和安宁河等,南部属于珠江流域的南盘江水系,主要河流包括泸江、甸溪河、巴盘江和黄泥河等。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与预处理

研究采用从NASA官网([www.reverb.echo.nasa.gov](http://www.reverb.echo.nasa.gov))获取的MOD13Q1 NDVI植被指数产品数据,空间分辨率为250 m,周期为

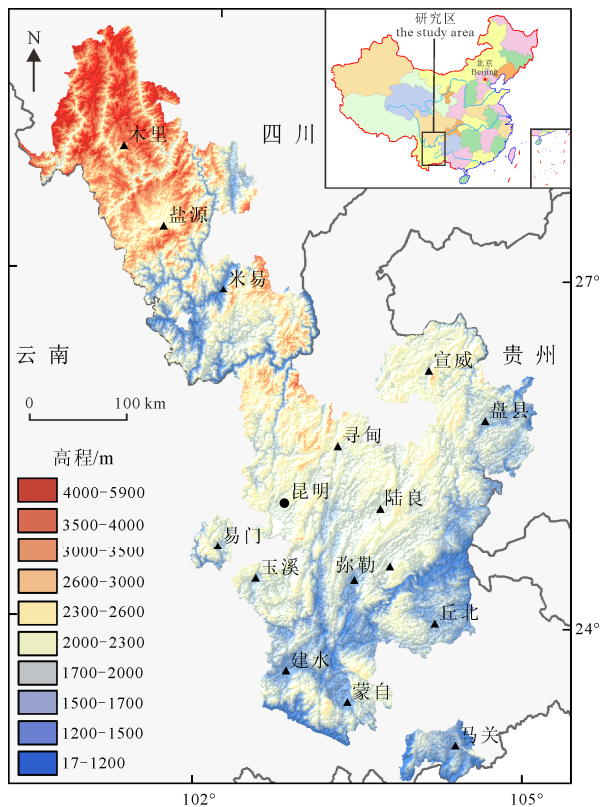


图 1 断陷盆地概况图

Fig. 1 The location of the faulted basin

16 天。首先利用 MRT(MODIS Reprojection Tool)软件实现对影像的拼接及投影转换。然后采用最大合成法(MVC)得到研究区 2001—2016 逐年 NDVI 时间序列数据,用于表征当年植被最好的生长情况。气象产品包括两套数据:一套是基于中国气象数据共享网站得到的 2001—2016 年断陷盆地及周边 43 个气象站点气温和降水数据,通过克里金插值(Kriging)对年降水和年均气温数据进行插值得到 250 m 的栅格数据集;另一套是未来气候数据来自耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)气候发布未来气候的预估数据,该套数据由 ISI-MIP(The Inter-Sectoral Impact Model Inter-comparison Project)提供并进行了气候模式数据的插值和订正,由 IPCC 运用不等权重加权方法进行集合而成(<http://www.isi-mip.org>),空间分辨率为  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ,为和历史气象数据及 MODIS NDVI 数据的分辨率保持一致,将气候预估数据重采样至 250 m。

研究选用 2011 年 Climatic Change 出版的“典型浓度路径”(Representative concentration pathways, RCPs)分别代表未来人口不断增多、技术革新不高、能源改善缓慢、缺乏应对气候变化政策的极端温室气体排放情景(RCP8.5)和未来通过改变能源体系、开展碳捕获及地质储藏技术等途径限制温室气体排放的适应性温室气体排放情景(RCP4.5),用以分别预测 2020—2050 年的降水和气温情况。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 长时间序列下的气候条件与 NDVI 关系拟合与预测

利用 ENVI IDL 建立 2001—2016 年断陷盆地历史实测降水、温度数据自变量  $X_i(i=1, 2, 3, \dots, K)$  和 NDVI(因变量  $Y$ )的多元线性回归模型,研究历史与 NDVI 之间的相互关系,为下文预测未来不同气候情景对植被变化的影响趋势提供了合理方案。该模型表示为:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$$

式中:  $Y$  为 2001—2016 年 NDVI 时间序列数据;  $\beta_i(i=1, 2, \dots, K)$  是回归系数;  $X_1$  为降水数据;  $X_2$  为温度数据。

通过历史气候数据和 NDVI 计算得到的研究区单个网格的  $\beta_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$  的系数值,最后通过 RCP4.5 和 RCP8.5 不同气候情景下温度和降水数据去预测 2020—2050 年 NDVI 的值。

### 2.2.2 NDVI 变化趋势分析

采用非参数趋势分析(Theil Sen Median, TS)(Tucker et al., 1991; Milich and Weiss, 2000; Lunetta et al., 2006)方法对研究区 2001—2016 年 NDVI 的变化趋势进行计算,TS 趋势分析可以有效减少异常值影响(袁丽华等, 2013),是一种比较稳健的趋势计算方法,其公式为:

$$\beta = \text{mean}\left(\frac{\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i}{j - i}\right)$$

式中  $\text{NDVI}_j$ 、 $\text{NDVI}_i$  为栅格数据集 ( $2001 \leq i \leq j \leq 2016$ );  $\beta$  为植被变化趋势,当  $\beta > 0$  时,表明 NDVI 呈上升趋势,当  $\beta < 0$  时,表明 NDVI 呈下降趋势。

通过 Mann-Kendall 检验法(Sen, 1968)对趋势变化进行显著性检验。Mann-Kendall 作为非参数统计检验,其样本不需要服从一定的分布,也不受少数异常值干扰的影响,本研究取置信水平  $\alpha=0.05$ ,判断趋势变化的显著性。

## 3 结果与分析

### 3.1 断陷盆地未来气候时空变化特征

2020—2050 年在 RCP4.5 和 RCP8.5 气候情景下,断陷盆地年均温度和降水量分别呈显著上升和不显著上升趋势。在 RCP8.5 情景下温度和降水量的增幅分别为 RCP4.5 情景的 2 倍和 3 倍(图 2)。总体而言,两种预测情景下,未来断陷盆地都将呈现整体增温增湿的变化趋势。

在 RCP4.5 情景下(图 3),断陷盆地升温趋势为  $0.13 \sim 0.21^{\circ}\text{C/a}$ ,从空间上看,温度的增幅呈现出地域分异性,增温迅速的地区主要分布在北部的木里

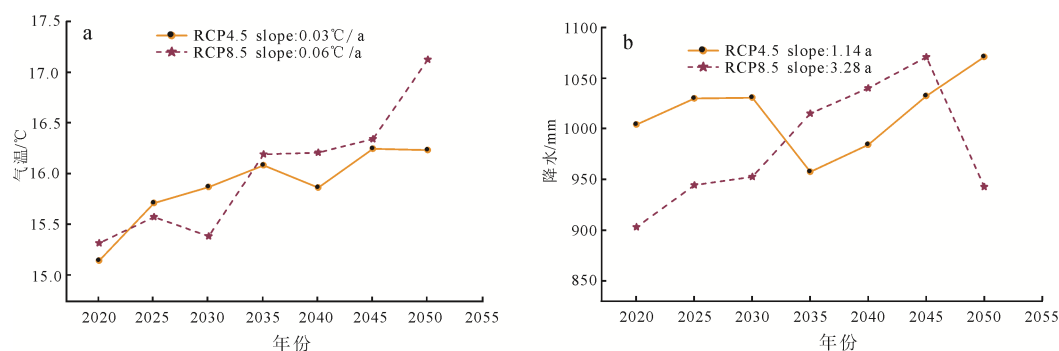


图 2 未来情景下断陷盆地 2020—2050 年期间温度(a)和降水(b)年际变化

Fig. 2 Variations of annual temperature (a) and precipitation (b) in the faulted basin from 2020 to 2050 under future climate scenarios

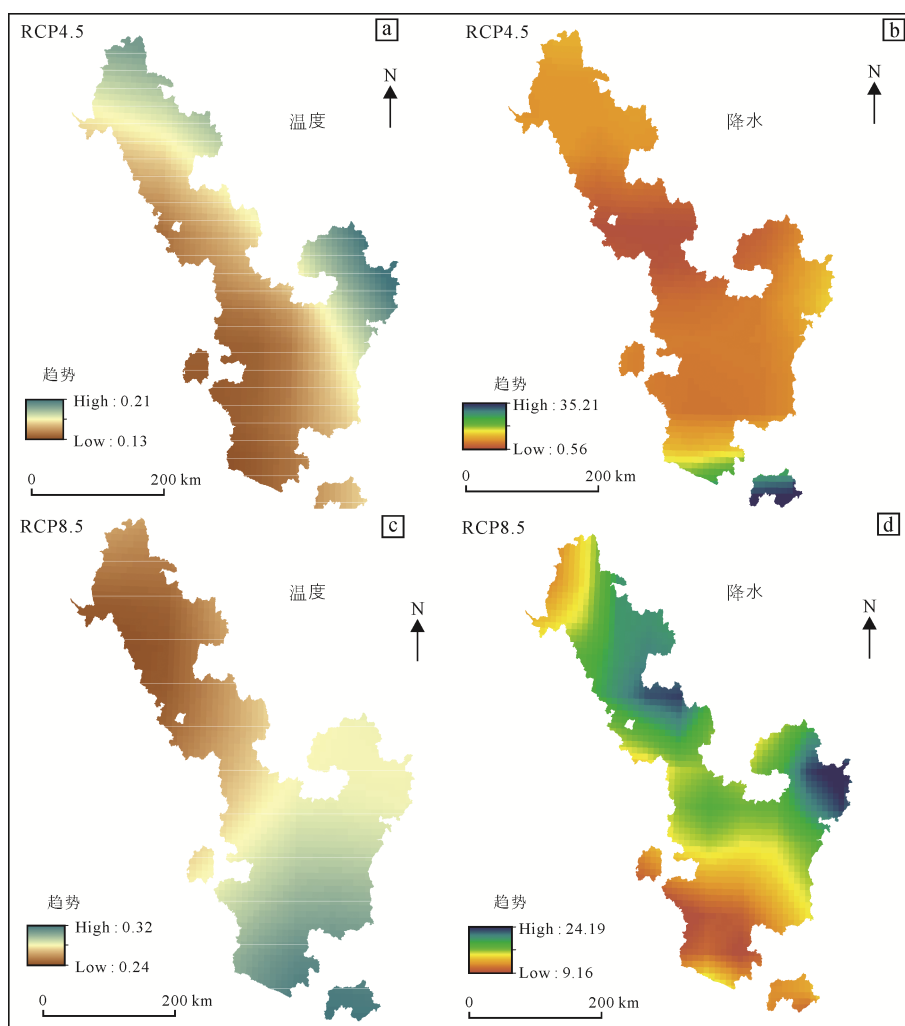


图 3 断陷盆地 2020—2050 年期间温度和降水变化趋势

Fig. 3 Trends of seasonal temperature and precipitation in the faulted basin from 2020 to 2050 under future climate scenarios

地区和东部盘县、宣威等地;研究区中部、南部、增温暖慢的地区。断陷盆地降水量增加速率在 0.56~35.21 mm/a 之间,增速极大的区域集中于南部盘龙江流经的文山地区。降水变化迟缓的地区面积占比较大,典型分布在云贵边界金沙江两岸地区。

在 RCP8.5 情景下(图 3),全区温度增幅较 RCP4.5 情景下明显增强且表现出明显的西北快、东南慢的空间分异性。相较 RCP4.5 情景,降水量大幅

增加,两大增长极分布集中于云贵边界可渡河地区和鲁南山东北侧,降水增加幅度相对较缓地区分布在青藏高原东南缘木里地区和横断山脉东侧地区。

### 3.2 断陷盆地未来植被时空变化特征

为检验断陷盆地利用历史温度和降水构建的模型对未来 NDVI 预测的解释度,利用 ArcGIS 软件随机点功能在研究区随机选取了 2011 年的 900 个验证点(图 4)(何宝忠等, 2016),对断陷盆地 NDVI 实

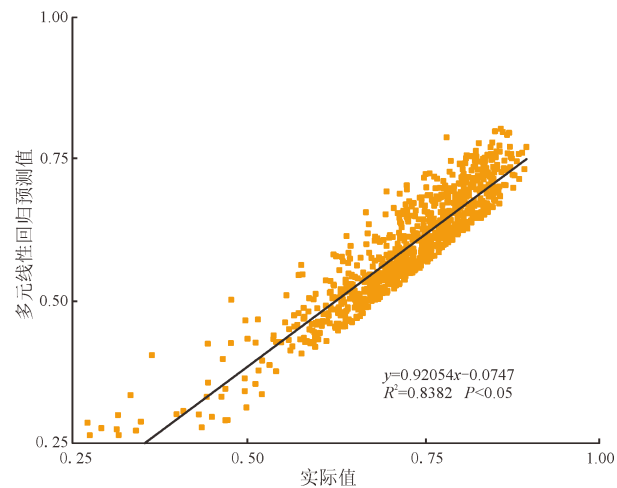


图 4 NDVI 预测值精度验证  
Fig. 4 Precision of the NDVI predicting

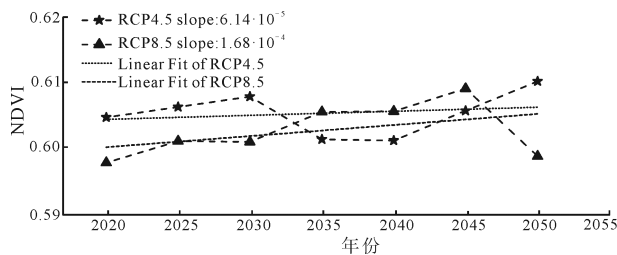


图 5 2020—2050 年断陷盆地 NDVI 变化曲线  
Fig. 5 Variations of annual NDVI in the faulted basin from 2020 to 2050

际值和预测值进行数据拟合，通过精度验证，可知拟合系数中 $R^2$ 达到了0.83，说明在未来气候情景下，利用多元线性回归方程根据2020—2050年降水和温度数据预测断陷盆地未来NDVI值具有较高的可信度。

预测得到 2020—2050 年期间，两种碳排放水平的气候条件下断陷盆地 NDVI 年均值在 0.59~0.61 之间浮动(图 5)，NDVI 均值总体呈轻微波动上升趋势，并于 2035 年前后两种情景 NDVI 均值将发生较大转折性变化。RCP8.5 情景下的 NDVI 均值上升速率较快，约为 RCP4.5 情景下的 2.8 倍。

为分析断陷盆地 2020—2050 年间植被 NDVI 的变化趋势，本研究采用 TS 趋势分析和 MK 检验，将通过显著性检验(取置信度 95%)的值根据 NDVI 变化率分为严重退化( $\leq -5\%$ )、轻微退化( $-5\%\sim 0$ )、轻微改善( $0\sim 5\%$ )、明显改善( $\geq 5\%$ )四个等级(图 6)。结果分析表明：总体来看，两种情景下的植被 NDVI 变化趋势在空间分布上均呈现出明显分异性，主要体现为西北退化、东南改善的总体趋势。

在 RCP4.5 情景下，断陷盆地植被明显改善和轻微改善分别占比 8.93%和 17.97%(表 1)，改善地区具体分布于木里高海拔地区、盐源盆地和云贵高原

表 1 不同未来气候情景下 NDVI 变化趋势分类面积

Table 1 The different classification areas of NDVI change trend under future climate scenarios

| 气候情景   | 严重退化   | 轻微退化   | 轻微改善   | 明显改善   | 总和     |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| RCP4.5 | 7.74%  | 12.94% | 17.97% | 8.93%  | 47.58% |
| RCP8.5 | 16.58% | 10.62% | 5.94%  | 38.21% | 71.35% |

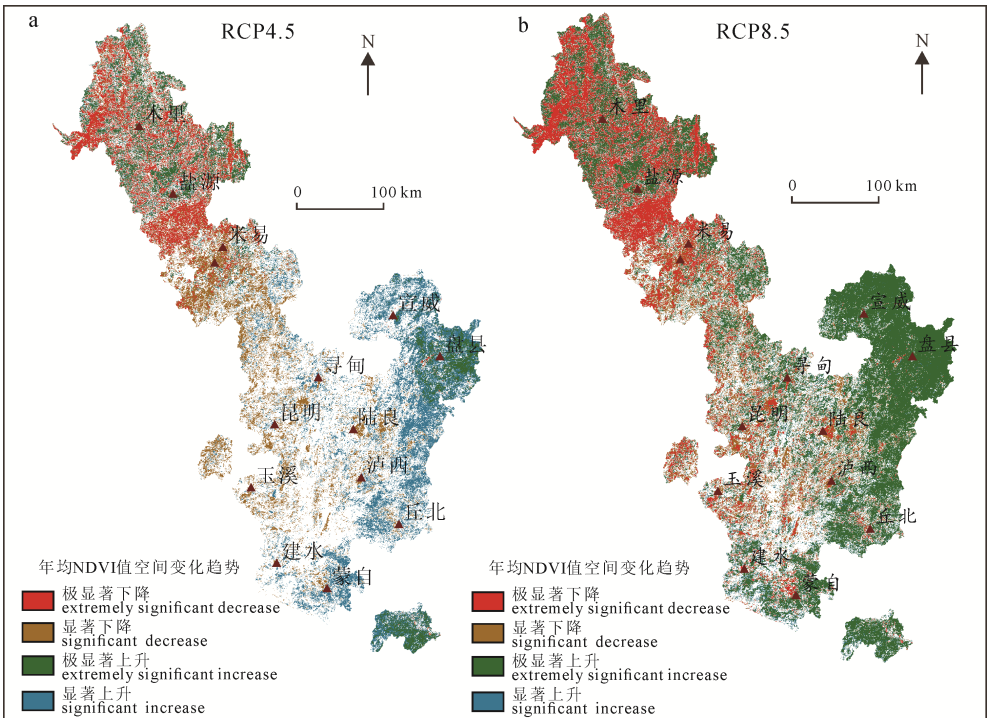


图 6 未来气候情景下 NDVI 空间变化特征  
Fig. 6 Spatial distributions of annual NDVI change trend under future climate scenarios

中部地区;严重退化和轻微退化的面积分别占比 7.74%和 12.94%,主要分布于木里河谷地区、攀西裂谷北部地区。总体而言植被改善地区较植被退化地区面积略大 0.69 km<sup>2</sup>。在 RCP8.5 情景下,植被 NDVI 变化剧烈程度较高,较 RCP4.5 情景,植被明显改善的面积扩大了近 30%,严重退化的面积也增加了 1 倍之多(表 1)。在空间分布上,植被明显改善区域分布较为集中于云贵边境地区和北部海拔较高的山区地带。严重退化的区域多分布在低海拔的木里河谷地区和盐源盆地,轻微退化区域零散分布于西南部的大城市群附近。

### 3.3 植被对未来气候变化的响应

探究植被退化区域的水热条件变化以及植被变化为提前提出针对该区域预防性的植被修复方案提出可能。参照温度和降水变化趋势(图 3),RCP4.5 情景下温度升高速率慢的地区同时也体现出植被 NDVI 不同程度的退化现象,如滇东高原地区体现出的轻微退化和攀西裂谷地区体现出的严重退化现象;另一方面,降水量增长幅度与植被 NDVI 变化也表现出较某些一致的空间分布特征,如南部文山地区降水量大幅增加其植被长势也发生了明显改善,而木里河谷地区、攀西裂谷北部植被严重退化期间这些地区的降水量增幅也十分缓慢。

RCP8.5 情景下,温度变化的空间差异与植被 NDVI 变化也体现出一定的正相关响应,即东南增温快且植被大面积改善明显、西北增温慢且植被多明显退化。结合降水量变化趋势分析发现,植被发生明显退化的区域常发生在温度升高较慢且降水量涨幅低的区域,典型地区是木里河谷地区;植被发生明显改善的区域常发生在升温和降水量增长同时较快的区域,如云贵边界地区,该结论同样适用 RCP4.5 情景的 NDVI 预测结果。

总体而言,在两种未来气候情景下,不同的气候变化趋势将会导致区域植被变化产生较大的差异性,如未来增温的大背景下,增湿迅速导致区域植被恢复明显,增湿缓慢导致区域植被退化严重。断陷盆地南部和东南部即滇东高原南缘和云贵边界地区是现阶段石漠化治理措施密集分布区域,且石漠化治理已初见成效(庄义琳和吴秀芹, 2019),同时伴随未来气候趋势性变化该地区也将呈现不同程度的植被自然恢复,因此该地区应列为长时间跨度生态恢复工程中的重点保护区;断陷盆地北部如木里河谷地区和盐源盆地、攀西裂谷北部等地建设用地区分布较广且现石漠化治理措施开展较为匮乏(史晨露和吴秀芹, 2020),在未来水热条件综合作用下植被的退化趋势将更加难以逆转,据此该地区应结合地

方自然及人文具体情况参照未来气候变化趋势,尽早选用适当的石漠化治理措施(如林草措施、农业技术措施、工程措施等),开展植被恢复和生态治理。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

在全球变暖的背景下,运用新一代温室气体排放情景模拟计算未来气候情景数据下的岩溶断陷盆地气候变化趋势和植被 NDVI 变化趋势,为了解当地植被变化的气候驱动机制研究提供了参考依据,同时探究在未来气候水热条件综合作用下植被的变化趋势,有助于为区域生态治理、植被恢复工程提供因地制宜的科学布设方案。

目前,NDVI 与气候因子之间的相关性研究已通过遥感手段得到了广泛的观察研究,参照澜沧江流域的植被与气候响应研究(Ouyang et al., 2019),在该流域 RCP4.5 情景未来(2015—2050 年)暖干气候影响之下,全区植被质量将会呈积极趋势,区分空间尺度,海拔高度对 NDVI 变化趋势的影响十分显著,即 NDVI 变化具有垂直格局,且不同海拔植被 NDVI 对温度和降水的响应差异性较大,主要表现为海拔 3000 m 以下的地区植被与气候的相互作用更为敏感,靠近河流的地区植被退化更为剧烈。而本研究是针对两种不同未来气候情景的 NDVI 变化程度和趋势速率差异与气候因子的响应关系定性分析,缺乏对具体某个气象因素或地形地貌因素与 NDVI 变化之间响应的量化分析,导致某些特定区域内部排除气候影响的条件下无法定量辨别其退化原因。如青藏高原东南缘木里在未来气候情景下增温较明显但降水量增加缓慢而出现了暖干现象,该地区范围内海拔较低的河谷、盆地显现出较为严重的植被退化情况,这一定程度上也说明了低海拔地区对气候变化较高的敏感性。而同时因高海拔地区的植被多为针叶林和高寒草甸,在寒冷条件下对温度变化也十分敏感(Park et al., 2015),未来明显的增温趋势使得高山区植被退化将加速冰川的融化,将导致其他相关的水土流失和环境问题。因此,采取人工手段抑制温室气体的排放和开展碳捕获及地质储藏技术以达到较低的 RCP 情景十分必要(图 6),对未来生态治理和植被保护具有重大积极意义。

断陷盆地因其岩溶地貌发育导致降水的地下漏失严重,地上植被生长和居民生产生活用水十分匮乏,这也成为断陷盆地石漠化治理的重要难题。大范围的生态恢复工程如植树造林、退耕还林还草等造成的植被覆盖度的变化对流域的影响仍存争议性,但已有研究论证地表植被覆盖度和降雨量增加

是永久性地表水增加的重要因素(Yi et al., 2020)。在断陷盆地石漠化现阶段治理中, 应充分参考未来气候变化中的降雨因素和治理区域植被覆盖度状况, 将未来地表可利用水增加和植被 NDVI 呈增长趋势的地区纳入生态良性循环地区, 石漠化治理主要以自然修复措施为主, 主要考虑本研究区东南部如文山盘龙河流域、盘县马别河流域、宣威可渡河流域等地。

区域植被生长情况受水热条件共同控制, 但是不同季节主导的控制因素可能会不同, 不同时间尺度下主导的控制因素也有别差, 这也是在接下来的研究中应该重点关注的问题。但同时也因未来气候变化影响因子的复杂性, 其趋势也存在一定的不确定性, 本研究对于未来气候情景下的气候和植被变化趋势预测还需要进一步考虑到自然因素和社会经济因子的多因素共同作用, 而在考虑多种因素的情况下植被变化趋势是非线性的, 本研究所采用的多元线性回归方法的预测精度就相对不足, 往后深入研究需要在拟合方法上做更进一步的探索。

## 4.2 结论

本研究利用断陷盆地 2001—2016 年历史气象数据和 NDVI 的线性关系, 预测未来情景下 2020—2050 年间较低温室气体排放情景(RCP4.5)和高温温室气体排放情景下(RCP8.5)的气候和 NDVI 变化特征和趋势进行分析发现: (1)预测 2020—2050 年期间, 断陷盆地在两种未来情景下均呈增温增湿的趋势。两种 RCPs 情景下的气候变化趋势相比较, 在高温温室气体排放的 RCP8.5 情景下, 温度增幅总体高于低温温室气体排放的 RCP4.5 情景。RCPs4.5 情景下断陷盆地降水增长趋势较为平缓, 仅南部文山地区的增幅高达 35.21%·a。而 RCPs8.5 情景下全区降水增长较为明显且增幅的空间分异性较强。(2)预测 2020—2050 年随着时间的推移, 断陷盆地植被 NDVI 年均值在两种不同未来气候条件下均将超越基准期 0.59 的背景值, 实现波动上升。从时间尺度来看, RCP8.5 情景下的 NDVI 年均值增长速度较 RCPs4.5 快 2.8 倍, 且 RCPs8.5 情景下的植被变化更为剧烈。划分研究区植被 NDVI 变化趋势显著的地域空间分别为四个变化等级后分析发现未来气候情景下的植被 NDVI 存在类似的空间分异性: 即西北退化、东南改善的总体趋势。未来植被将趋于明显改善的区域集中于云南东部、云贵边界地区; 趋于严重退化的区域集中于木里河谷、攀西裂谷。

## Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research and Development Program of China (Nos.

2016YFC0502500 and 2016YFC0502506), and National Natural Science Foundation of China (No. 41671080).

## 参考文献:

- 曹建华, 邓艳, 杨慧, 蒲俊兵, 朱同彬, 蓝芙宁, 黄芬, 李建鸿. 2016. 喀斯特断陷盆地石漠化演变及治理技术与示范[J]. 生态学报, 36(22): 7103-7108.
- 郭灵辉, 郝成元, 吴绍洪, 高江波, 赵东升. 2016. 21 世纪上半叶内蒙古草地植被净初级生产力变化趋势[J]. 应用生态学报, 27(3): 803-814.
- 何宝忠, 丁建丽, 张喆, 阿布都瓦斯提·吾拉木. 2016. 新疆植被覆盖度趋势演变实验性分析[J]. 地理学报, 71(11): 1948-1966.
- 霍晓英, 彭守璋, 任婧宇, 曹扬, 陈云明. 2018. 陕西省油松林生产力动态及对未来气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 29(02): 412-420.
- 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 李双双. 2015. 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, 70(5): 705-716.
- 刘宪锋, 任志远, 林志慧, 刘焱序, 张东海. 2013. 2000-2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征[J]. 地理学报, 68(7): 897-908.
- 潘颖, 林杰, 佟光臣, 唐鹏, 张金池, 顾哲衍. 2018. 2004—2014 年太湖流域植被覆盖时空变化特征[J]. 生态与农村环境学报, 34(01): 37-45.
- 彭淑惠, 王宇, 张世涛. 2008. 昆明岩溶断陷盆地的环境地质问题及治理对策[J]. 地质灾害与环境保护, 19(2): 98-103.
- 史晨璐, 吴秀芹. 2020. 喀斯特断陷盆地土地利用对生态系统生产力的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 56(2): 341-351.
- 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 闻新宇, 黄建斌. 2012. 新一代温室气体排放情景[J]. 气候变化研究进展, 8(4): 305-307.
- 王宇, 张华, 张贵, 王波, 彭淑惠, 何绕生, 周翠琼. 2017. 喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能[J]. 中国岩溶, 36(03): 283-295.
- 王宇. 1993. 滇东地区断陷岩溶盆地裸露—覆盖型岩溶水系统特征剖析——以吴家营岩溶水系统为例[J]. 云南地质, 12(3): 301-316.
- 吴协保, 孙继霖, 林琼, 吴照柏. 2009. 我国西南岩溶石漠化土地生态建设分区治理思路与途径探讨[J]. 中国岩溶, 28(4): 391-396.
- 杨辰, 顾宇丹, 王强, 曲凌鸽, 金玲, 常炉予. 2018. RCP4.5 和 RCP8.5 气候变化情景下上海市暴雨内涝适应性[J]. 气象科技, 46(05): 162-169.
- 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2013. 2000-2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. 生态学报, 33(24): 7798-7806.
- 周桐宇, 江敏, 孙汪亮, 孙彬. 2018. RCPs 情景下福建省水稻生产的适应性调整模拟研究[J]. 中国水稻科学, 32(3): 265-276.
- 庄义琳, 周金星, 吴秀芹, 曹建华, 章维鑫. 2019. 2001—2016

年喀斯特断陷盆地植被变化及其驱动因素[J]. 林业科学, 55(09): 177-184.

## References:

- CAI H, YANG X, XU X. 2015. Human-induced grassland degradation/restoration in the central Tibetan Plateau: The effects of ecological protection and restoration projects[J]. *Ecological Engineering*, 83(83): 112-119.
- CAO Jian-hua, DENG Yan, YANG Hui, PU Jun-bing, ZHU Tong-bin, LAN Fu-ning, HUANG Fen, LI Jian-hong. 2016. Rocky desertification evolution, treatment technology and demonstration in Karst faulted basins, Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36(22): 7103-7108(in Chinese with English abstract).
- FRIEND A D, LUCHT W, RADEMACHER T T, KERIBIN R, BETTS R, CADULE P, CIAIS P, CLARK D B, DANKERS R, FALLOON P D, ITO AKIHIKO, KAHANA R, KLEIDON A, LOMAS M R, NISHINA K, OSTBERG S, PAVLICK R, PEYLIN P, SCHAPHOFF S, VUICHARD N, WARSZAWSKI L, WILTSHIRE A, WOODWARD F I. 2014. Carbon residence time dominates uncertainty in terrestrial vegetation responses to future climate and atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9): 3280-3285.
- GUO Ling-hui, HAO Cheng-yuan, WU Shao-hong, GAO Jiang-bo, ZHAO Dong-sheng. 2016. Projected changes in vegetation net primary productivity of grassland in Inner Mongolia, China during 2011-2050[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27(3): 803-814(in Chinese with English abstract).
- HE Bao-zhong, DING Jian-li, ZHANG Zhe, ABDUWASIT G. 2016. Experimental analysis of spatial and temporal dynamics of fractional vegetation cover in Xinjiang[J]. *Acta Geographica Sinica*, 71(11): 1948-1966(in Chinese with English abstract).
- HUO Xiao-ying, PENG Shou-zhang, REN Jing-yu, CAO Yang, CHEN Yun-ming. 2018. Dynamic change of Pinus tabulaeformis forest productivity and its response to future climate change in Shaanxi Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 29(02): 412-420(in Chinese with English abstract).
- JULIEN Y, SOBRINO J A, VERHOEF W. 2006. Changes in land surface temperatures and NDVI values over Europe between 1982 and 1999[J]. *Remote Sensing of Environment*, 103(1): 43-55.
- KUMAR B P, BABU K R, RAMACHANDRA M, KRUPAVATHIA C, SWAMY B N, SREENIVASULU Y, RAJASEKHAR M. 2020. Data on Identification of Desertified Regions in Anantapur District, Southern India by NDVI Approach using Remote Sensing and GIS[J]. *Data in Brief*, 30(7): 105560.
- LIU Xian-feng, PAN Yao-zhong, ZHU Xiu-fang, LI Shuang-shuang. 2015. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Qinling-Daba Mountains in relation to environmental factors[J]. *Acta Geographica Sinica*, 70(5): 705-716(in Chinese with English abstract).
- LIU Xian-feng, REN Zhi-yuan, LIN Zhi-hui, LIU Yan-xu, ZHANG Dong-hai. 2013. The spatial-temporal changes of vegetation coverage in the Three-River Headwater Region in recent 12 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 68(7): 897-908(in Chinese with English abstract).
- LUNETTA R S, KNIGHT J F, EDIRIWICKREMA J, LYON J G, WORTHY L D. 2006. Land-cover characterization and change detection using multi-temporal MODIS NDVI data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 105(2): 142-154.
- LUO M, SA C, MENG F, DUAN Y, LIU Tie, BAO Y. 2020. Assessing extreme climatic changes on a monthly scale and their implications for vegetation in Central Asia[J]. *Journal of Cleaner Production*, 271(10): 122396.
- MILICH L, WEISS E. 2000. GAC NDVI interannual coefficient of variation (CoV) images: Ground truth sampling of the Sahel along north-south transects[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 21(2): 235-260.
- OUYANG Wei, WAN Xin-yue, XU Yi, WANG Xue-lei, LIN Chun-ye. 2019. Vertical difference of climate change impacts on vegetation at temporal-spatial scales in the upper stream of the Mekong River Basin[J]. *Science of The Total Environment*, 701(1): 134782.
- PAN Ying, LIN Jie, TONG Guang-chen, TANG Peng, ZHANG Jin-chi, GU Zhe-yan. 2018. Spatio-temporal Variations of Vegetation Coverage in Taihu Lake Basin From 2004 to 2014[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 34(01): 37-45(in Chinese with English abstract).
- PANG G, WANG X, YANG M. 2017. Using the NDVI to identify variations in, and responses of, vegetation to climate change on the Tibetan Plateau from 1982 to 2012[J]. *Quaternary International*, 444(7): 87-96.
- PENG J, LIU Z, LIU Y, WU J, HAN Y. 2012. Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai-Tibet Plateau using Hurst Exponent[J]. *Ecological Indicators*, 14(1): 28-39.
- PENG Shu-hui, WANG Yu, ZHANG Shi-tao. 2008. The environmental and geological problems and the countermeasures of the karst fault basin in Kunming[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 19(2): 98-103(in Chinese with English abstract).
- PETTORELLI N, VIK J O, MYSTERUD A, GAILLARD J M, TUCKER C J, STENSETH N C. 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9): 503-510.
- SEN P K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324): 1379-1389.
- SHI Chen-lu, WU Xiu-qin. 2020. Impact of Land Use on Ecosystem Productivity in Karst Faulted Basin[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 56(2): 341-351(in Chinese with English abstract).
- SWAIN S, ABEYSUNDARA S, HAYHOE K, STONER A M K. 2017. Future changes in summer MODIS-based enhanced vegetation index for the South-Central United States[J]. *Ecological Informatics*, 41(10): 1016.
- TONG X, WANG K, YUE Y, BRANDT M, LIU B, ZHANG C, LIAO C, FENSHOLT R. 2017. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long-term vegetation dy-

- namics in the karst regions of Southwest China[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 54: 105-113.
- TUCKER C J, NEWCOMB W W, LOS S O, PRINCE S D. 1991. Mean and inter-year variation of growing-season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989[J]. International Journal of Remote Sensing, 12(6): 1133-1135.
- WANG Shao-wu, LUO Yong, ZHAO Zong-ci, WEN Xin-yu, HUANG Jian-bin. 2012. New Generation of Scenarios of Greenhouse Gas Emission[J]. Climate Change Research, 8(4): 305-307(in Chinese with English abstract).
- WANG Yu, ZHANG Hua, ZHANG Gui, WANG Bo, PENG Shu-hui, HE Rao-sheng, ZHOU Chui-qiong. 2017. Zoning of environmental geology and functions in karst fault-depression basins[J]. Carsologica Sinica, 36(03): 283-295(in Chinese with English abstract).
- WANG Yu. 1993. Analysis of the characteristics of exposed and covered karst water systems in fault basins, east yunnan—Example: wujiaying karst water system[J]. Yunnan Geology, 12(3): 301-316(in Chinese with English abstract).
- WU Xie-bao, SUN Ji-lin, LIN Qiong, WU Zhao-bai. 2009. Research on division treatment to eco-construction of karst rock deserted land in southwest China karst area[J]. Carsologica Sinica, 28(4): 391-396(in Chinese with English abstract).
- YANG Chen, GU Yu-dan, WANG Qiang, QU Ling-ge, JIN Ling, CHANG Lu-yu. 2018. Adaptability of Urban Flooding in Context of Climate Change under RCP4.5 and RCP8.5 in Shanghai[J]. Meteorological Science and Technology, 46(05): 162-169(in Chinese with English abstract).
- YUAN Li-hua, JIANG Wei-guo, SHEN Wen-ming, LIU Ying-hui, WANG Wen-jie, TAO Liang-liang, ZHENG Hua, LIU Xiao-fu. 2013. The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 33(24): 7798-7806(in Chinese with English abstract).
- ZENG Y, YANG X, FANG N, SHI Z. 2020. Large-scale afforestation significantly increases permanent surface water in China's vegetation restoration regions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, (8)290: 108001.
- ZHANG G, DONG J, XIAO X, HU Z, SHELDON S. 2012. Effectiveness of ecological restoration projects in Horqin Sandy Land, China based on SPOT-VGT NDVI data[J]. Ecological Engineering, 38(1): 20-29.
- ZHANG Ge-li, XU Xing-liang, ZHOU Cai-ping, ZHANG Hong-bin, OUYANG Hua. 2011. Responses of Vegetation Changes to Climatic Variations in Hulun Buir Grassland in Past 30 Years[J]. Acta Geographica Sinica, 66(1): 47-58(in Chinese with English abstract).
- ZHAO J, HUANG S Z, HUANG Q, WANG H, LENG G, FANG W. 2020. Time-lagged response of vegetation dynamics to climatic and teleconnection factors[J]. Catena, 189: 204474 doi.org/10.1016/j.catena.104474.
- ZHENG Y, HAN J, HUANG Y, FASSNACHT S R, XIE S, LV E, CHEN M, STEVEN R F. 2017. Vegetation response to climate conditions based on NDVI simulations using stepwise cluster analysis for the Three-River Headwaters region of China[J]. Ecological Indicators, 92(9): 18-29.
- ZHOU Tong-yu, JIANG Min, SUN Wang-liang, SUN Bin. 2018. Simulation of Rice Adaptability Adjustment in Fujian Province Under RCPs Scenarios[J]. Chinese Journal of Rice Science, 32(3): 265-276(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Zhao-qiang, DING Yi-bo, SHI Hai-yun, CAI Huan-jie, FU Qiang, LIU S, LI Tian-xiao. 2020. Analysis and prediction of vegetation dynamic changes in China: past, present and future[J]. Ecological Indicators, 117:106642. doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106642.
- ZHU Li-jun, MENG Ji-jun, ZHU Li-kai. 2020. Applying Geodetector to disentangle the contributions of natural and anthropogenic factors to NDVI variations in the middle reaches of the Heihe River Basin[J]. Ecological Indicators, 117(10): 106545.
- ZHUANG Yi-lin, ZHOU Jin-xing, WU Xiu-qin, CAO Jian-hua, ZHANG Wei-xin. 2019. Vegetation Change and It's Driving Forces in Karst Faulted Basins between 2001 and 2016[J]. Science Silvae Sinicae, 55(09): 177-184(in Chinese with English abstract).