

DOI: 10.5846/stxb201811162481

孙彩红, 苏泳娴, 韩留生, 吴建平, 刘礼杨, 陈修治, 邓玉娇, 杨沅志, 姜杰, 林晖. 广东省 2004—2016 年植被冠层降雨截留模拟及时空变化特征. 生态学报, 2020, 40(7): 2252-2266.

Sun C H, Su Y X, Han L S, Wu J P, Liu L Y, Chen X Z, Deng Y J, Yang Y Z, Jiang J, Lin H. The simulation and spatial-temporal variations of atmospheric rainfall interception by vegetation canopies based on MODIS LAI data at the basin scale in the Guangdong Province from 2004 to 2016. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(7): 2252-2266.

广东省 2004—2016 年植被冠层降雨截留模拟及时空变化特征

孙彩红^{1,2}, 苏泳娴^{1,*}, 韩留生^{1,2}, 吴建平¹, 刘礼杨¹, 陈修治³, 邓玉娇⁴, 杨沅志⁵,
姜 杰⁵, 林 晖⁶

1 广东省遥感与地理信息系统重点实验室, 广东省地理空间信息技术与应用开放实验室, 广州地理研究所, 广州 510070

2 山东理工大学, 淄博 255049

3 中国科学院华南植物园, 广州 510650

4 广东省生态气象中心, 广州 510640

5 广东省林业调查规划院, 广州 510520

6 广东环境保护工程职业学院, 佛山 528216

摘要:评价植被冠层降雨截留能力, 是生态系统水循环的重要研究内容。以广东省中小流域为例, 结合地面监测站点的降雨量数据和 MODIS 叶面积指数遥感数据, 利用植被冠层降雨截留模型, 定量模拟和分析了广东省流域尺度 2004—2016 年的地表植被冠层降雨截留能力及其时空变化特征。结果表明: (1) 2004—2012 年广东省年均植被冠层降雨截留率持续下降, 2016 年略有上升, 并且随着时间的推移, 流域之间的植被冠层降雨截留率差异越来越小。 (2) 广东省植被冠层降雨截留能力呈现山区东西两翼高, 山区中部以及沿海地区低的显著空间差异格局, 这种空间格局与植被覆盖 LAI 主要呈现由珠三角向外围递增的圈层空间格局特征密切相关, 而与由南向北逐渐递减的降雨空间格局特征相关性不大。 (3) 森林覆盖对流域植被冠层降雨截留能力有着一定的影响, 其中流域内阔叶林占森林面积的比例对这种影响的程度起着最为关键的作用。

关键词:降雨截留率; 植被冠层; 时空格局; LAI; 遥感; 流域

The simulation and spatial-temporal variations of atmospheric rainfall interception by vegetation canopies based on MODIS LAI data at the basin scale in the Guangdong Province from 2004 to 2016

SUN Caihong^{1,2}, SU Yongxian^{1,*}, HAN Liusheng^{1,2}, WU Jianping¹, LIU Liyang¹, CHEN Xiuzhi³, DENG Yujiao⁴,
YANG Yuanzhi⁵, JIANG Jie⁵, LIN Hui⁶

1 Guangdong Provincial Key Laboratory of remote sensing and GIS, Guangdong Open Laboratory of Geospatial Information Technology and Application, Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China

2 Shandong University of Technology, Zibo 255049, China

3 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

4 Guangdong Ecological Meteorological Center, Guangzhou 510640, China

5 Guangdong Forestry Survey and Planning Institute, Guangzhou 510520, China

基金项目:国家自然科学基金(41971275, 31971458, 41907289); 广东省科学院实施创新驱动发展能力建设专项(2019GDASYL-0103002)

收稿日期:2018-11-16; **网络出版日期:**2019-12-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: suyongxian@163.com

6 Guangdong Environmental Protection Engineering Vocational College, Foshan 528216, China

Abstract: Evaluating the rainfall interception capacity of vegetation canopies is an important component of water cycling in ecological systems. We employed a model of atmospheric rainfall interception by vegetation canopies with observed precipitation data from weather stations and MODIS leaf area index (LAI) data to quantitatively estimate the rainfall interception capacity of the vegetation canopy at a small-medium basin scale in the Guangdong province from 2004 to 2012 and reveal its spatial and temporal variation. The results showed that: (1) the annual mean rainfall interception rate of the canopy (RIRC) in Guangdong Province declined continuously during 2004—2012 but increased slightly in 2016. The spatial variability of RIRC has diminished progressively as time goes on. (2) The RIRC in Guangdong Province presented distinctive spatial patterns and was higher in the east and west mountain areas but lower in the central mountain and coastal areas. This spatial pattern was closely related to the spatial pattern of LAI, which mainly presented a ring pattern that increased from the Pearl River Delta to the periphery, but was not very related to the spatial pattern of rainfall, which showed a gradual decreasing trend from south to north. (3) The forest coverage rate had a certain impact on the canopy interception capacity, especially the areas of broad-leaved forest in the basins.

Key Words: rainfall interception; canopy; temporal and spatial pattern; LAI; remote sensing; basin

植被冠层降雨截留是降雨过程中被植被冠层所截留下来无法落到地面的降雨量,是降雨再分配的首个环节,在不同程度上影响着到达地面的降雨量空间分布,从而影响土壤入渗、产流等水循环过程^[1-2]。了解地区的植被冠层降雨截留能力对科学评价一个区域植被的水源涵养能力以及土壤侵蚀缓解能力起着重要的作用。

国内外的学者对植被冠层降雨截留做了大量研究。早期的研究大多基于野外定点实测或者室内浸泡,统计分析不同降雨强度下不同树种之间、不同林分之间或者不同区域之间植被冠层截留降雨能力差异^[3-7],并建立简单的经验统计模型,但是这种定点观测无法产生普适性的研究结果,对于植被冠层结构和气候特征相似的林冠层系统才适用,不能外延试验,不易推广^[8-9]。随着大量研究的开展,人们发现植被冠层降雨截留过程受到诸多因素的影响,主要包括降雨量、降雨特性、冠层特征、雨前冠层湿润程度、气象条件等^[10-11],随后一些带机理性的概念模型和物理模型逐渐涌现,如 Horton 模型^[8]、Rutter 模型^[12]、Liu 模型^[13]、Gash 解析模型^[14-15]、Aston 模型^[16]、A.P.J.DE ROO 模型^[17]等,但由于模型参数较多,给大尺度的植被冠层降雨截留能力估算带来了极大的困难。Aston^[16]和 A.P.J.DE ROO^[17]等学者提出在大尺度层面,除了气象因素外,植被叶面积指数是确定植被冠层降雨截留的关键因素。近年来遥感技术的成熟,利用红光和近红外两个波段的反射率组成的光谱植被指数来估算叶面积指数被广泛应用和认可,使得结合遥感等空间信息数据与植被冠层降雨截留模型估算大尺度植被冠层降雨截留能力成为新的研究热点^[17]。

广东省地处亚热带,多暴雨、多山地、多红壤的自然环境条件,造成广东省的水土流失十分的严重^[18]。近 30 年,广东省森林数量和质量都发生了较大的变化,广东省特别是珠三角地区经济得到迅速发展,城市扩张建设征用了大量的林业用地,大量的天然林被毁,林业面积曾一度大面积减少,20 世纪 90 年代以来,全省实施林业保护政策和灭荒造林工程,林地面积逐步回升,但依然呈现天然林不断减少,人工林不断增多的局面^[19]。在森林结构和质量变化的背景下,定量模拟和分析广东省植被冠层降雨截留及其时空变化特征,有助于全面了解广东省生态水文耦合机理,揭示生态系统对水文过程的调节作用,认清森林对水土流失的缓解作用,并指导林业政策提供理论依据。

本文采用 A.P.J.DE ROO 等^[17]构建的植被冠层降雨截留模型,结合地面监测站点降雨数据和 MODIS 叶面积指数(LAI)遥感数据,定量模拟和分析了 2004—2016 年的广东省流域尺度植被冠层降雨截留能力的时空分布特征。与前人的研究以山(祁连山^[3-4]、六盘山^[5-6]等)、森林群落(贵州典型森林群落^[20])、植被类型(青海云山林^[3-4]、高山栎林^[21]、杉木人工林^[22]、毛竹林^[23]、次生毛竹林^[24]等)、自然保护区(托木尔峰自然保

保护区^[25]、井冈山国家级自然保护区^[26]等)为研究对象不同,本研究以流域尺度作为研究单元。流域是由社会、经济、自然和环境相互作用共同耦合而成的单个独立的完整生态系统,以流域作为研究尺度,其研究结果更具有理论意义和应用价值。

1 区域概况

广东省是我国的南大门,与香港、澳门、广西、云南、江西及福建接壤,地跨中亚热带、南亚热带和北热带,气候温暖、热量丰富,降雨总量多、强度大、季节性强^[7]。地貌多样,以山脉为主,山脉之间有大小谷地和盆地分布,此外还有以珠江三角洲为代表的冲积平原。河流众多,集雨面积 3000 km²以上河流有珠江、韩江、鉴江、漠阳江、东江、西江、北江等,形成了 7 大流域(图 1)。植被类型多样,自然森林植被由北向南分布有亚热带常绿阔叶林、亚热带季雨林和热带季雨林。广东省最重要的地带性土壤是红壤、赤红壤、砖红壤,面积分别占全省土壤面积的 37.96%、24.8%、5.15%。广东省本底土壤肥力较差,加之因人为因素,自然植被破坏较多,水土流失也较严重^[18]。

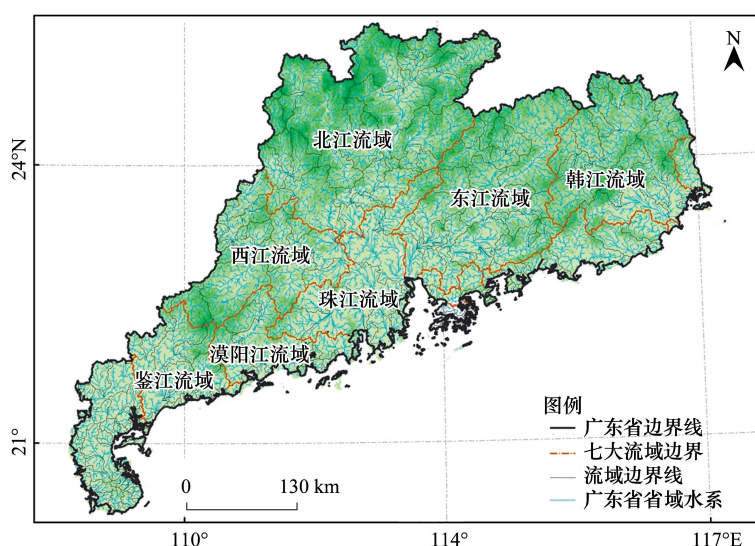


图 1 广东省流域图

Fig.1 Watersheds in Guangdong Province

2 数据与方法

2.1 数据收集与处理

(1) 降雨数据

来自广东省 87 个基准地面气象观测站点的 2004 年 1 月—2016 年 12 月日降雨量数据,数据精度 0.1 mm。利用 ArcGIS 反距离加权插值法,将站点测得的日降雨量数据插值生成 500 m × 500 m 分辨率的日降雨量栅格数据,再将每天的降雨量数据累加得到月累计降雨量数据和年累计降雨量数据。

(2) 叶面积指数(LAI)遥感数据

叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)是指单位地表面积上方植物叶面积之和^[27]。由于早期的遥感数据分辨率较低,且不同数据源产品的不确定性使其可比性难以保证,文中采用来自地理空间数据云 MODIS 陆地标准产品—MOD13A1(16 天合成的分辨率为 500 m 的植被指数产品)。MODIS 仪器与 NOAA 卫星和陆地其他卫星相比:1)空间分辨率大幅提高。由 NOAA 的千米提高到了 MODIS 的百米级。2)时间分辨率更具优势。MODIS 卫星一天可过境 4 次(NOAA 卫星一天过境 2 次),对各种突发性、快速变化的自然灾害有更强的实时

监测能力。3) 光谱分辨率大大提高。MODIS 卫星有 36 个波段(NOAA 卫星有 5 波段), 这种多通道观测增强了对地球复杂系统的观测能力和对地表类型的识别能力。本文利用 ENVI 软件对原始 MODIS-LAI 数据进行拼接并裁剪, 提取了广东省范围内的 LAI 数据, 然后用 ArcGIS 软件对数据进行加和平均, 获取广东省 2004—2016 年每月和每年的 LAI 栅格数据(分辨率为 500 m)。为保证分析的准确性, 本文仅选择高质量的 MODIS-LAI 数据(标记为 0, 1, 2)进行分析。

(3) 小流域划分

基于广东省 30 m 分辨率的数字高程数据 DEM(Digital Elevation Model), 利用 ArcGIS 的水分分析工具, 将二、三级支流以下以分水岭或下游河道出口断面为界, 集水面积在 50 km² 以下的相对独立和封闭的自然汇水区域划分为小流域(图 1), 共划分为 7 大流域(北江流域、东江流域、韩江流域、西江流域、珠江流域、漠阳江流域、鉴江流域), 1367 个小流域。

2.2 方法

(1) 基于次降雨量数据的植被冠层降雨截留量计算

采用 A.P.J.DE ROO 等^[17] 构建的植被冠层降雨截留模型, 基于叶面积指数和降雨量计算植被冠层降雨截留量。具体计算公式如下:

$$S_v = S_{\max} \times [1 - e^{-\eta \frac{P_{\text{cum}}}{S_{\max}}}] \quad (1)$$

$$\eta = 0.040 \times \text{LAI} \quad (2)$$

$$S_{\max} = 0.935 + 0.498 \times \text{LAI} - 0.00575 \times \text{LAI}^2 \quad (3)$$

式中, S_v 为每次降雨的植被冠层降雨截留量(mm), P_{cum} 为每次降雨的降雨量(mm), $S_{\max}$ 为最大植被冠层降雨截留能力(即截留容量, mm), η 为校正系数, LAI 为叶面积指数。该公式的理论假设是当 $P_{\text{cum}} = 0$ 时, $S_v = 0$, 当 $P_{\text{cum}} \rightarrow \infty$ 时, $S_v =$ 最大截留量($S_{\max}$)。

(2) 基于次降雨量数据的植被冠层降雨截留率计算

植被冠层降雨截留率是每次植被冠层降雨截留量占每次降雨量的百分比, 见公式(4):

$$a = \frac{S_v}{P_{\text{cum}}} \times 100 \quad (4)$$

式中, a 为植被冠层降雨截留率(%), 其他同上。

(3) 月均/年均植被冠层降雨截留量/率计算

将一个月内基于次降雨量数据的植被冠层降雨截留量/率计算结果, 进行加和平均, 得出月均植被冠层降雨截留量/率, 同理, 将一年内基于次降雨量数据的植被冠层降雨截留量/率计算结果, 进行加和平均, 得出年均植被冠层降雨截留量/率。

(4) 利用倾向值法(SLOPE)分析广东省植被冠层降雨截留率的变化趋势

为明确各流域的时间变化特征, 本文利用一元线性回归模型计算 2004—2016 年 13 年间的变化斜率, 即倾向值(SLOPE), 来分析每个流域植被冠层降雨截留率的线性倾向^[28], 计算公式为:

$$\text{SLOPE} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n x_i A_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n A_i}{n \times \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (5)$$

式中, n 是总年份数, 等于 13; x_i 是第 i 年(2004 年为第一年); A_i 代表第 i 年对应的植被冠层降雨截留率。

(5) 植被冠层降雨截留量等级划分标准

为直观反映广东省植被冠层降雨截留能力的空间分布特征, 根据 2004 年的累计植被冠层降雨截留量, 以 60 mm 和 90 mm 分别作为阈值, 将广东省植被冠层的降雨截留能力划分为高截留区、中截留区和低截留区 3 个等级, 如表 1 所示。

表 1 植被冠层降雨截留量等级划分表

Table 1 Categorization of atmospheric rainfall interception induced by vegetation canopy

等级 Grade	高截留区 High interception area	中截留区 Moderate interception area	低截留区 Low interception area
植被冠层降雨截留量 Rainfall interception rate of the canopy (RIRC)/mm	$s_v \geq 90$	$60 \leq s_v < 90$	$s_v < 60$

s_v 为累计植被冠层降雨截留量

3 结果与分析

3.1 广东省累计降雨量时空变化特征

广东省降雨主要呈现由南向北逐渐递减的空间格局特征,这种格局在多雨年份尤为突出(图 2)。对广东省年平均降雨量栅格数据进行统计,分析发现 2004 年、2008 年、2012 年、2016 年区域年降雨量平均值分别为 1334.18、1531.58、1875.43、2327.89 mm,可见近年来受全球气候变暖的影响^[29],广东省降雨整体呈现增加的趋势。其中,增加最为明显的区域是沿海地区和粤东地区,这主要受夏秋季副热带气旋等极端气候的增加^[29]所致(图 2)。从 7 大流域来看(图 3),每个流域的降雨量均呈现增加的趋势,与广东省整体趋势相同。西江流域和珠江流域每年的增长速度尤为突出,增长范围介于 0—1000 mm;北江流域、东江流域和韩江流域在 2004—2008 年降雨量略有增长,增长范围介于 0—90 mm,2008—2016 年降雨量增长较为快速,增长范围介于 0—1200 mm;漠阳江流域和鉴江流域 2004—2008 年降雨量增长较为快速,增长范围介于 0—730 mm,2008—2012 年降雨量增长缓慢,增长范围介于 0—240 mm,2012—2016 年降雨量略有减少,减少范围介于 0—160 mm。此外,年平均降雨量数据呈现明显地带性,沿海的降雨量明显大于内陆。降雨量相对较少的区域多处于

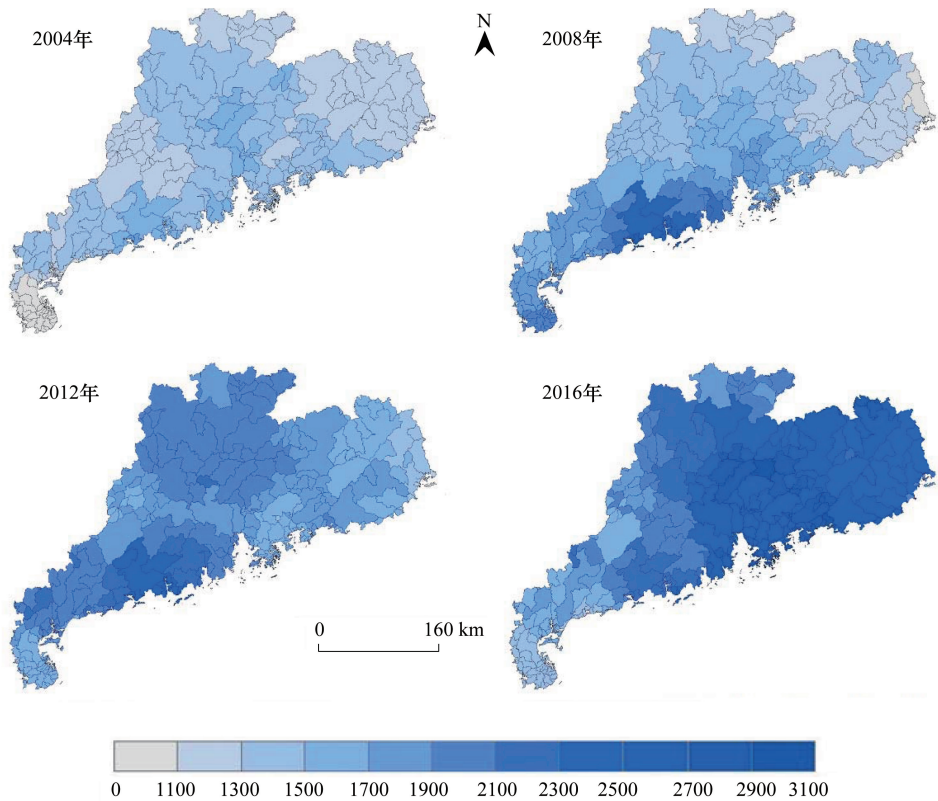


图 2 2004—2016 年广东省年平均降雨量空间分布图

Fig.2 Spatial patterns of annual mean rainfall in Guangdong Province from 2004 to 2016

四周高,中间低的盆地地貌(例如北江流域),四周的高地是造成其降雨量相对较少的原因。降雨相对较多的区域一般处于地形较为平坦的沿海或处于两边高耸中间低洼的谷地(如漠阳江流域)。

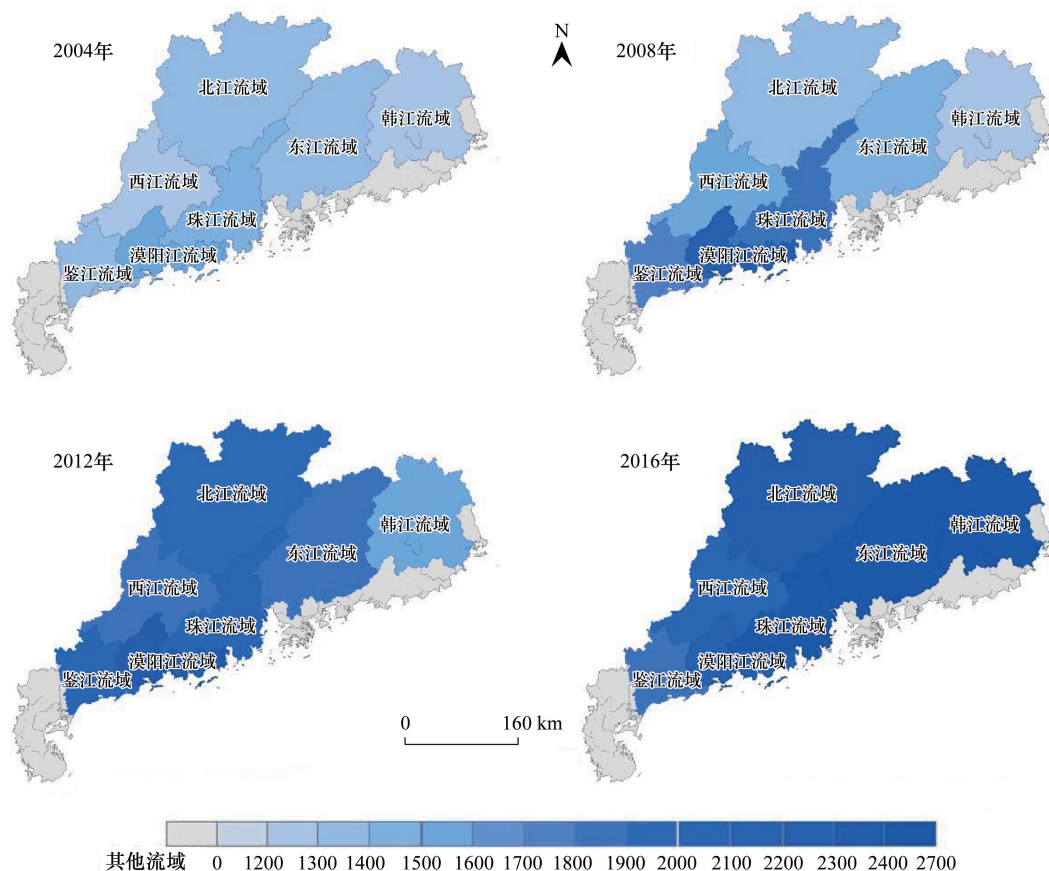


图 3 2004—2016 年七大流域年平均降雨量空间分布图

Fig.3 Spatial variations of annual mean rainfall in seven major basins from 2004 to 2016

3.2 广东省叶面积指数时空变化特征

将年均叶面积指数值划分为 19 个等级(即小于 0.2, 0.2—0.4, 0.4—0.6, 0.6—0.8, 0.8—1.0, 1.0—1.2, 1.2—1.4, 1.4—1.6, 1.6—1.8, 1.8—2.0, 2.0—2.2, 2.2—2.4, 2.4—2.6, 2.6—2.8, 2.8—3.0, 3.0—3.2, 3.2—3.4, 3.4—3.6 和大于 3.6), 从空间分布格局来看(图 5), 广东省地表植被存在较大的空间异质性。珠三角地区、潮汕平原、雷州半岛以及山脉间大小谷地、盆地植被指数均较低(0.0—0.2), 究其原因是:(1)珠三角地区是广东省经济发达、人口较密集、开发强度较大的主要地区, 而潮汕平原由于常年遭受台风的侵袭以及来自海洋的海风、海雾等因素^[28]影响植被的生长, 珠江三角地区和潮汕

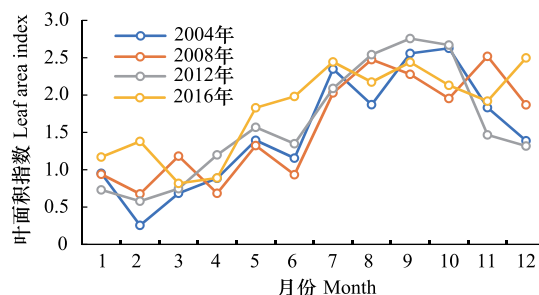


图 4 2004—2016 年广东省月平均 LAI 变化

Fig.4 Monthly variations of LAI in Guangdong Province from 2004 to 2016

平原植被覆盖度最低, 叶面积指数小于 1.2; (2) 雷州半岛位于广东省最南端且地处热带, 地势呈龟背形向三面倾斜, 河流短浅且径流速度快, 夏季风降雨困难, 导致雷州半岛易发生干旱, 又因其地处亚热带季风区, 是台风的主要路径, 每年 5—10 月受台风影响^[30]易发生洪涝灾害之苦, 故植被生长环境较差。斜贯粤西、粤中和

粤东北的罗平山脉、粤东的莲花山脉、粤北的一些弧形山脉、粤东少量西北至东南走向的山脉、粤东和粤西西南至东北走向的山脉年均叶面积指数均在 2 以上,这是由于这些地区植被立地及生长条件较好^[31],森林覆盖面积较大,森林质量较高^[32]。可见地形地貌等生态本底以及经济发展程度是目前影响广东省植被空间分布格局的重要因素。从历年的变化情况来看(图 5),广东省 2004、2008、2012 和 2016 年年均叶面积指数分别为 1.50、1.57、1.59、1.80,可见近年来广东省整体植被覆盖率在增加。按照 7 大流域进行进一步分析发现(图 6),北江流域、西江流域和漠阳江流域年均叶面积指数增加量最大,从 2004 年的 1.51 持续增长到 2016 年的 2.14;珠江流域和东江流域年均叶面积指数略有增加,珠江流域从 2004 年的 0.98 持续增长到 2016 年的 1.27,东江流域从 2004 年的 1.71 持续增长到 2016 年的 1.91;而韩江流域年均叶面积指数增长不明显,在 2012 年后甚至出现略微减少的趋势。从月均变化情况来看(图 4),3—10 月(春季、夏季和初秋)是植被的生长期,LAI 指数持续增长;11—2 月(深秋和冬季)是植被的休眠期,11 月开始 LAI 指数持续减小,2 月份到达低谷。

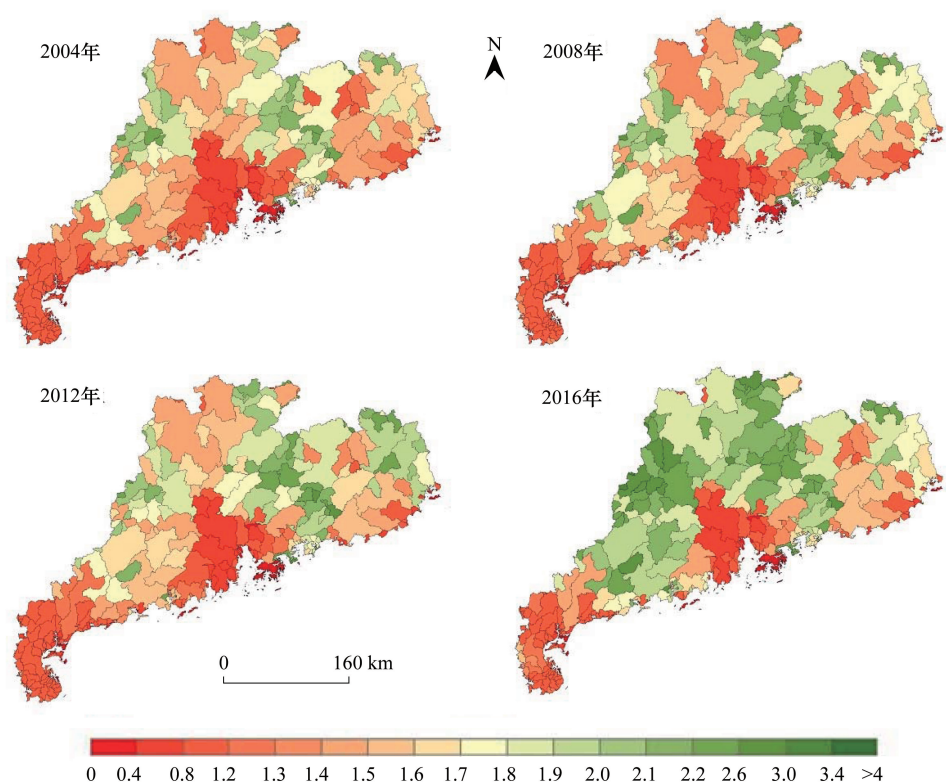


图 5 2004—2016 年广东省年均 LAI 空间分布图

Fig.5 Spatial patterns of annual mean LAI in Guangdong Province from 2004 to 2016

3.3 广东省植被冠层降雨截留能力时空变化特征

3.3.1 广东省植被冠层降雨截留量年际变化

基于 2004 年累计植被冠层降雨截留量,依据截留等级划分标准,将广东省累计植被冠层降雨截留量空间分布分为 3 个不同区域(图 7)。

I 高截留区:集中分布在山地植被茂盛的地区,即西山河流域、白云水流域、凤江水流域、波罗坑流域、新丰江流域、西林河流域、忠信水流域、柏埔河流域、清溪河流域、西支江流域。由表 2 可以看出,2004—2016 年的高截留区年平均植被冠层降雨截留量都在 90 mm 以上,总体呈缓慢增长的趋势。

II 中截留区:集中分布在粤东、粤北、粤西的东北等山地和山脉间大小谷地地区,即织箕河流域、潭水河流域、曹江河流域、黄华江流域、漠阳江流域、锦江流域、镇海水流域、新兴江流域、南江流域、绥江流域、小北江流

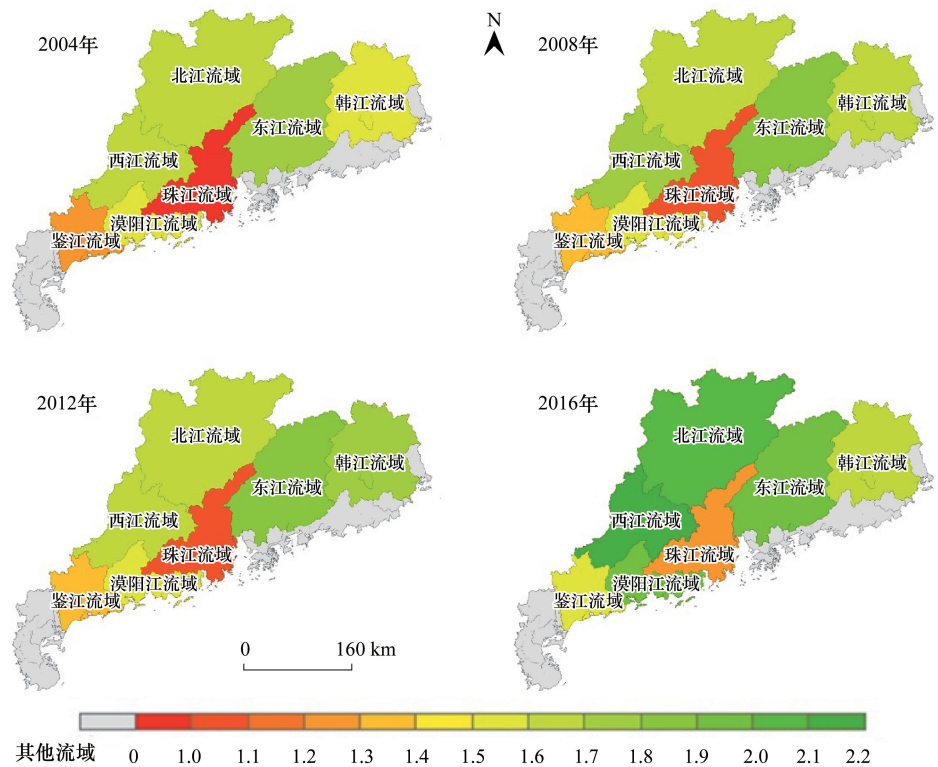


图 6 2004—2016 年七大流域年均 LAI 空间分布图

Fig.6 Spatial variations of annual mean LAI in seven major basins from 2004 to 2016

域、滨江流域、北江流域、浈江流域、翁江流域、流溪河流域、增江流域、东江流域上游、琴江流域、梅江流域、韩江流域、榕江流域、黄岗河流域。

Ⅲ低截留区:集中分布在珠江三角洲平原、雷州半岛、潮汕平原、粤西西南地区,即南渡河流域、西溪河流域、九洲江流域、凌江流域、鉴江流域、梅江流域、沙琅江流域、三夹海流域、潭江流域、西江流域、沧江河流域、珠江流域、东江流域下游、螺河流域、龙江流域、练江流域、岐岭河流域、宁江流域、程河流域、三利溪流域、浈江流域、武江流域等。

由表 2 可以看出,2004—2016 年的 3 个级别截留区的年平均植被冠层降雨截留量均在逐年增长。至 2016 年,中截留区的年平均植被冠层降雨截留量已超过 90 mm 的阈值,达到 131.83 mm,同时低截留区的年平均植被冠层降雨截留量也超过 60 mm 的阈值,达到 70.26 mm。可见,近年来随着年降雨的增长和植被覆盖率的提升,高级别的截留区(高截留区和中截留区)数量也在增加。

表 2 2004—2016 年不同等级区域平均植被冠层降雨截留量的年际变化/mm

Table 2 Mean atmospheric rainfall interception induced by vegetation canopy in different subregion

年份 Year	I 高截留区 High interception area	II 中截留区 Moderate interception area	III 低截留区 Low interception area
2004	94.51	71.22	45.48
2008	90.88	72.92	52.68
2012	101.22	82.66	59.61
2016	131.83	107.23	70.26

3.3.2 广东省植被冠层降雨截留率年际变化

2004—2016 年月植被冠层降雨截留率(图 8)均呈现以下规律:3 月份的植被冠层降雨截留率最低,4 月份开始回升,10 月份达到植被冠层降雨截留率的最高值,11 月开始减少直到次年 3 月。但是值得注意的是,随着年份的推进,月份之间的波动不断减缓,从 2004 年的月均植被冠层降雨截留率差异(最大值与最小值之间的差别)6.26%减少到 2016 年的 4.41%。2004—2016 年广东省植被冠层降雨截留率空间分布图(图 9)的统计结果表明,广东省 2004、2008、2012 年植被冠层降雨截留率持续下降,2016 年植被冠层降雨截留率略有上升,年平均值分别为 4.80%、4.53%、4.05%、4.13%。结合公式(1)—(4)以及降雨和 LAI 的年变化趋势,我们认为导致这种时间变化趋势原因可能有以下两个方面:

虽然近年来降雨量和 LAI 均在增加,但是(1)降雨量的增加一方面会一定程度增加植被冠层对降雨的截留量(公式 1),而植被叶片对水分的吸收有一个饱和值,一般来说,前期随着降雨量的增加植被冠层对降雨的截留量也在逐渐增加,但当降雨量增加到一定程度时,植被冠层对降雨的截留量将逐渐达到饱和,植被冠层降雨截留量趋于平稳;(2)另一个方面,降雨量的增加对植被冠层降雨截留率起抑制作用(公式 4),当这种抑制作用大于植被冠层 LAI 增加给植被冠层降雨截留率所带来的驱动作用(公式 4)时,植被冠层降雨截留率将呈现下降的趋势。

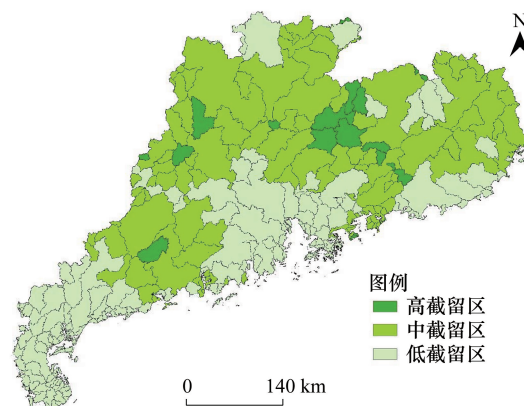


图 7 植被冠层降雨截留量等级划分图

Fig. 7 Spatial pattern of subregion with different atmospheric rainfall interception

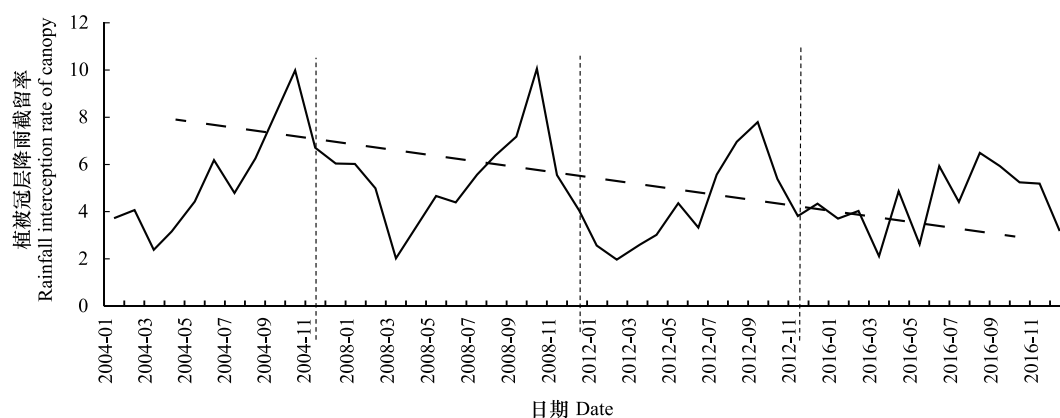


图 8 2004—2016 年广东省月均植被冠层降雨截留率变化趋势

Fig. 8 Variation of monthly mean rainfall interception rate of canopy (RIRC) in Guangdong Province from 2004 to 2016

从空间分布来看(图 9),2004 年广东省的植被冠层降雨截留率总体呈现山区东西两翼高,山区中部以及沿海地区低的显著空间差异格局,此时植被冠层降雨截留率大于 5%的流域有 149 个,占全省国土面积 40.75%,而小于 5%的流域有 1227 个,占全省国土面积的 59.25%,最大植被冠层降雨截留率和最小植被冠层降雨截留率分别为 11.67%、0.33%。但是随着时间的推移,这种空间的差异越来越小,到 2012 年,植被冠层降雨截留率大于 5%的流域仅有 79 个,占全省国土面积的 10.49%,最大植被冠层降雨截留率和最小植被冠层降雨截留率分别为 10.41%、0.34%。2004—2012 年,年均植被冠层降雨截留率减少较为明显的流域有南江流域、武江流域和琴江流域、西江流域与北江流域交界处和东江流域。但到 2016 年这种空间变化趋势得到减缓,粤北地区和粤西地区植被冠层降雨截留率略有上升,增加范围介于 0—1.22%,但粤东地区依然呈现明

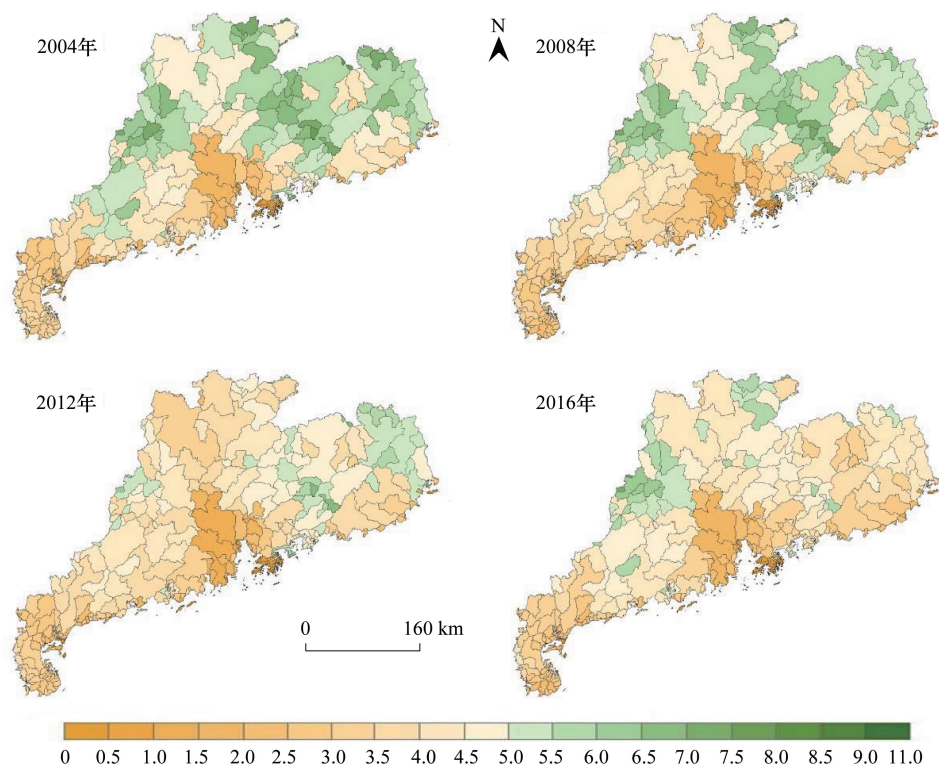


图 9 2004—2016 年广东省年均植被冠层降雨截留率空间分布图

Fig.9 Spatial patterns of annual mean RIRC in Guangdong Province from 2004 to 2016

显下降趋势,尤其是韩江流域植被冠层降雨截留率下降最为明显,减少范围介于 0—1.12%。导致年际空间差异性逐渐减少的原因主要是:从 4.1 和 4.2 的分析发现,随着年均 LAI 的增加和年降雨量的增加,年均 LAI 的空间异质性在增大(图 5),而年均降雨量的空间异质性在减小(图 2)。在 LAI 降雨截留量饱和阈值(公式 1)和降雨量对植被冠层降雨截留率的抑制效应(公式 4)的共同作用下,年均降雨的空间同质性对植被冠层降雨截留率空间格局的影响被进一步放大,而年均 LAI 的空间异质性对植被冠层降雨截留率空间格局的影响被进一步缩小,最后导致植被冠层降雨截留率的空间差异性在逐步减少的时间变化趋势特征。从 2004—2016 年 slope 变化图(图 10)来看,植被冠层降雨截留率增长空间仅分布在湛江南部以及阳江、茂名。

从 7 大流域来看(图 11),北江流域和西江流域 2004—2012 年植被冠层降雨截留率缓慢下降,减少范围介于 0—1.33%,2012—2016 年植被冠层降雨截留率有所上升,增加范围介于 0—0.74%;东江流域和韩江流域 2004—2016 年植被冠层降雨截留率持续下降,减少范围介于 0—1.41%;鉴江流域 2004—2016 年植被冠层降雨截留率基本保持不变;漠阳江的植被冠层降雨截留率波动最大,呈现先降后升的趋势。

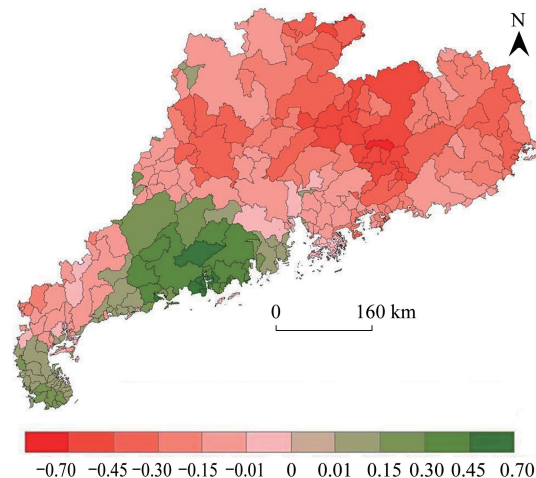


图 10 2004—2016 年广东省植被冠层降雨截留率时间变异 slope 指数分布图

Fig.10 Spatial patterns of slope index about RIRC in Guangdong Province from 2004 to 2016

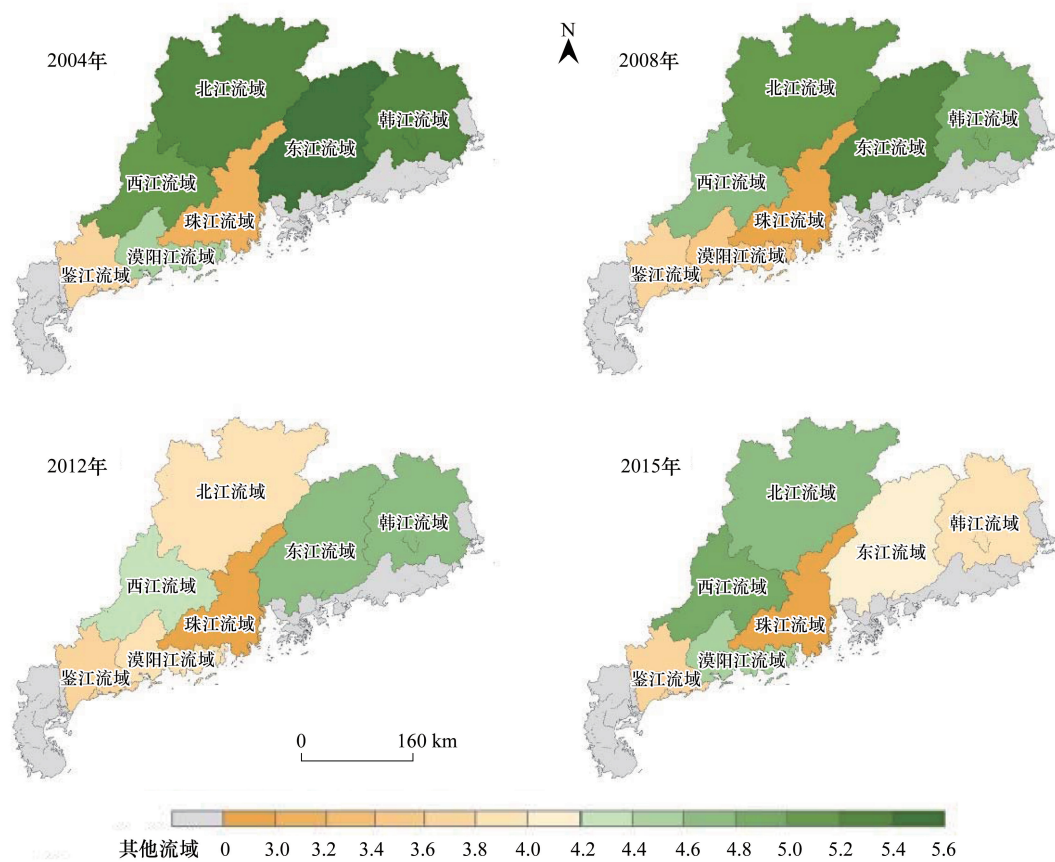


图 11 2004—2016 年七大流域年均植被冠层降雨截留率空间分布图

Fig.11 Spatial variations of annual mean RIRC in seven major basins from 2004 to 2016

3.4 气候与土地利用变化对典型流域植被冠层降雨截留率时空变化特征的影响

为分割背景气候以及土地利用变化对流域植被冠层降雨截留率的影响,而森林生态系统是影响植被冠层降雨截留率的主要土地利用类型^[33],因此本文首先在中亚热带、南亚热带南区、南亚热带北区和北热带(图 12)分别选取森林覆盖率相近(约 70%)的两个流域(表 3),分析所选流域内植被冠层降雨截留能力的特征(图 13)。研究发现,在同等森林覆盖率的情况下,中亚热带的植被冠层降雨截留率为 2.48%—5.08%,南亚热带北区的植被冠层降雨截留率为 4.03%—5.13%,南亚热带南区的植被冠层降雨截留率为 3.35%—4.15%,北热带的植被冠层降雨截留率为 2.34%—3.10%。可见气候区域对流域植被冠层降雨截留能力影响作用不存在显著的差异。

表 3 四个气候带内流域对的林地面积及覆盖率

Table 3 Areas and percentages of forests in basin-pairs at four climate zones								
气候带 Climatic zone	中亚热带 Mid subtropics		南亚热带北区 North of Southern-subtropics		南亚热带南区 South of South-subtropics		北亚热带 Northern-subtropics	
流域 Basin	鱼岩河 流域	武江 流域	潯江 流域	黄冈河 流域	南江 流域	龙江 流域	英利河 流域	大水桥 河流域
林地面积/hm ² Forest area	11692.88	260878.3	104807.6	97092.87	321499.5	155122.1	15207.23	18906.87
林地覆盖率/% Forest percentage	72.62	73.92	70.82	69.34	71.62	73.80	67.26	68.05

为剔除气候带的影响,分析地表覆盖变化对植被冠层降雨截留能力的影响,本文进一步提取各个气候带

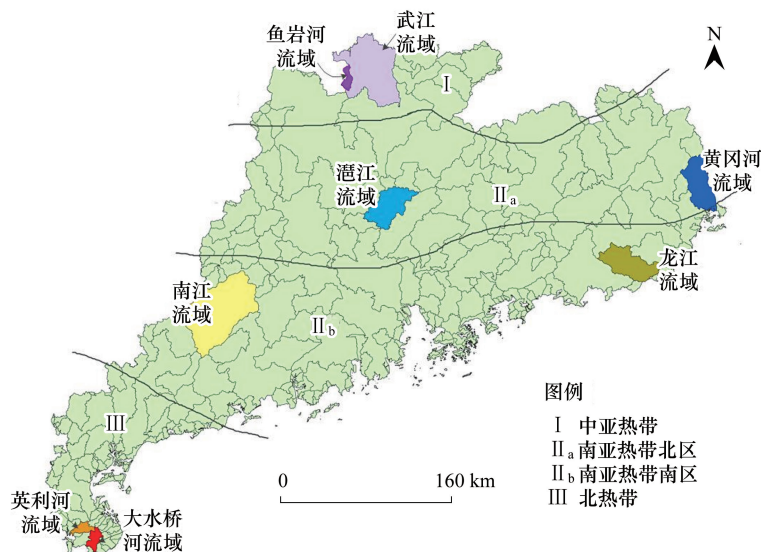


图 12 广东省四个气候带及典型流域空间图

Fig.12 Basin-pairs of four climate zone in Guangdong Province

内所有完整流域的森林生态系统,分析每个流域内森林覆盖面积比例与植被冠层降雨截留能力之间的关系,可以发现除中亚热带外,其他气候带的森林覆盖率与年均植被冠层降雨截留率之间均存在显著的线性相关关系 ($P < 0.001$) (图 14)。其中,亚热带南区 and 北区的相关性较好,相关性分别达到 0.81 和 0.65,而中亚热带和北热带的相关性较差,相关性分别仅为 0.23 和 0.19。可见,森林覆盖对植被冠层降雨截留能力有着一定的影响,但这种影响在部分区域不太明显。本文进一步通过分析发现森林内部的异质性(针叶林、阔叶林等林相的比例)比例发现(图 15),相关性较高的亚热带南区和亚热带北区均拥有较高的阔叶林比例,而相关性较差的中亚热带和北热带则拥有较高的针叶林或针阔混交林比例,可见阔叶林比例可能对流域植被冠层降雨截留能力起着关键的作用,但是这一结论尚需要未来更多的数据分析来支撑。

4 讨论和结论

植被的水源涵养功能是植被生态系统中的重要生态功能之一,植被冠层作为植被生态系统中的接触到大气降雨的界面,可以通过对降雨的截留作用,改变降雨的分配过程,缓和地表径流^[34]。过去的研究大多基于实地观测定点实验^[35],并重点关注森林生态系统的植被冠层降雨截留能力^[36]。然而一个区域内的其他生态系统类型的植被冠层也能对降雨起到很好的截留作用,例如草地生态系统类型^[37]、农田生态系统类型^[38]。本研究利用 MODIS 遥感数据对植被冠层信息获取的时空优势,结合植被冠层降雨截留模型,系统全面地重现了广东省历史时期的植被冠层降雨截留能力,本研究得出了以下几个结论:

(1) 本文基于 MODIS LAI 遥感数据估算的广东省小流域尺度的年均植被冠层降雨截留率变动范围是 0.33%—11.67%,与尹伊和陈海山^[2]用 CLM4.0 模拟全球尺度下的年平均植被冠层降雨截留率中广东地区结

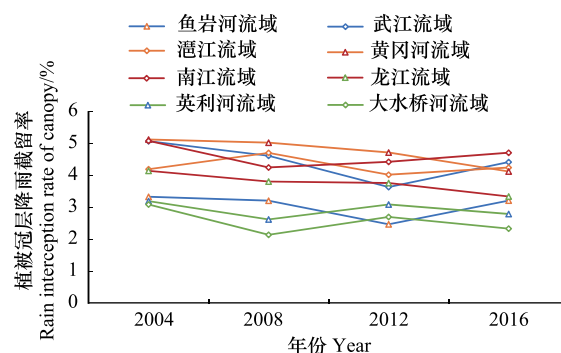


图 13 四个气候带代表性流域的植被冠层降雨截留率年变化趋势

Fig. 13 Annual variation of RIRC in basin - pairs at four climatic zones

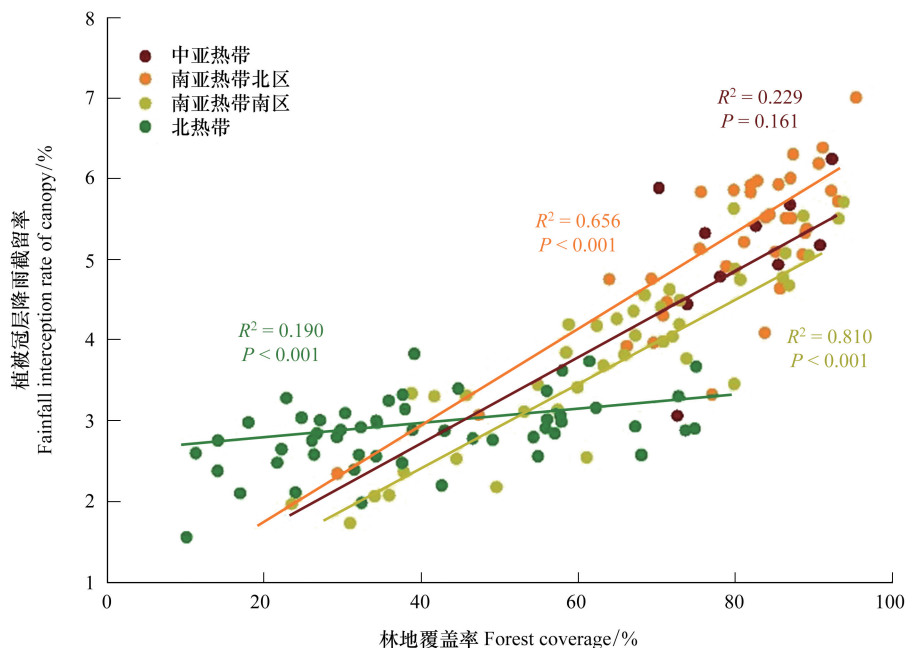


图 14 四个气候带林地覆盖率与植被冠层降雨截留率的相关性

Fig.14 The relationship between forest percentage and RICR in four climate zones

果基本一致,可见本文基于模型的模拟结果精度可靠。但低于森林生态系统的研究结果^[4-5,7,21-26],这是由于森林生态系统一般具有较高的植被冠层降雨截留能力,而本研究估算的是流域内所有生态系统类型的平均植被冠层降雨截留率。这种估算方法能更为准确全面得评估流域的真实植被冠层降雨截留能力。但是值得注意本文所采用的模型仅考虑了 LAI 和降雨这两个因素,实际上,植被冠层降雨截留能力还会受到其他因素的影响,如地势、风速、风向、气温等^[2],因此未来模型有待进一步的优化。

(2) 植被叶面积指数是决定广东省植被冠层降雨截留能力空间格局的主导因素。由植被冠层降雨截留量和植被冠层降雨截留率计算公式可知,降雨量和植被叶面积指数是影响区域植被冠层降雨截留时空特征的因素,两者的时空特征与变化共同决定着研究区内地表植被冠层降雨截留及其变化时空特征。通过本文的研究发现,广东省植被冠层降雨截留能力呈现山区东西两翼高,山区中部以及沿海地区低的显著空间差异格局,这种空间格局与植被覆盖 LAI 主要呈现由珠三角向外围递增的圈层空间格局特征密切相关,而与由南向北逐渐递减的降雨空间格局特征相关性不大。这是因为,广东省雨水充沛,且以强度降雨较大为主^[29],叶片容易达到其最大饱和截留量^[39],从而导致植被冠层降雨截留能力主要取决于叶片面积的多少,而不受降雨量多少的约束。

(3) 降雨是影响广东省整体植被冠层降雨截留能力时间变化趋势特征的重要因素。2004—2012 年广东省内植被冠层降雨截留率年平均值持续下降,2016 年植被冠层降雨截留率略有上升,并且随着时间的推移,流域之间的植被冠层降雨截留率差异越来越小。这是由于随着年均 LAI 的增加和年降雨量的增加,年均 LAI 的空间异质性在增大(图 5),而年均降雨量的空间异质性在减小(图 2)。在 LAI 植被冠层降雨截留量饱和阈

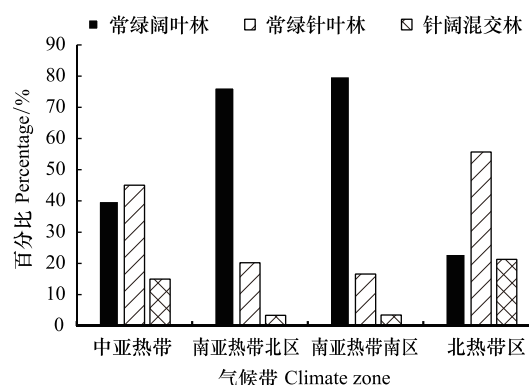


图 15 四个气候带 3 种典型森林类型占森林面积的比例

Fig.15 The percentages of three forest types in four climate zones

值^[31](公式 1)和降雨量对植被冠层降雨截留率的抑制效应(公式 4)的共同作用下,年均降雨的空间同质性对植被冠层降雨截留率空间格局的影响被进一步放大,而年均 LAI 的空间异质性对植被冠层降雨截留率空间格局的影响被进一步缩小,最后导致植被冠层降雨截留率的空间差异性以及植被冠层降雨截留率在逐步减小的时间变化特征。

(4)阔叶林是广东省植被冠层降雨截留的主要贡献者。通过分析四年 4 个气候带同等森林覆盖率的情况下的植被冠层降雨截留率发现,植被冠层降雨截留能力在 4 个气候带中无显著的差异。而流域内森林覆盖面积比例则与植被冠层降雨截留能力存在着显著的相关关系,可见流域的植被冠层降雨截留能力受地表覆盖的影响远远大于背景气候的影响,而流域内阔叶林占森林面积的比例对广东省植被冠层降雨截留率起着最为关键的作用,但是这一结论尚需要未来更多的数据分析来支撑。

基于以上结论,在降雨量不断增加的气候背景下,为进一步提高植被冠层降雨截留能力,政府应该把重点放在提高地表覆盖的 LAI 上,也就是进一步加强对流域生态系统的保护和建设。然而,广东省各地的经济发展水平,自然生态本底特征差异较大,这就需要相关部门因地制宜地制定可行的政策方案,例如对于经济发展水平较高的珠三角地区,经济发展对土地的需求量较大,应鼓励以公园+绿道+街角绿地为主体的绿地系统构建模式;对于林地面积较高的粤北山区,则应加强森林的保育,促进森林的自然演替,从而提供森林的质量,形成较高 LAI 覆盖地表比例;而对于湛江等沿海水土流失较为严重的地区,应鼓励以红树林+阔叶林+高密度草地为主体的生态系统覆盖模式。

参考文献(References):

- [1] 鲍文,包维楷,何丙辉,丁德蓉.森林生态系统对降水的分配与拦截效应.山地学报,2004,22(4):483-491.
- [2] 尹伊,陈海山.植被冠层截留对地表水分和能量平衡影响的数值模拟.气象科学,2013,33(2):119-129.
- [3] 彭焕华.祁连山北坡青海云杉林冠截留过程研究[D].兰州:兰州大学,2010.
- [4] 张学龙,罗龙发,敬文茂,王顺利,王荣新,车宗玺.祁连山青海云杉林截留对降水的分配效应.山地学报,2007,25(6):678-683.
- [5] 徐丽宏,时忠杰,王彦辉,熊伟,于澎涛.六盘山主要植被类型冠层截留特征.应用生态学报,2010,21(10):2487-2493.
- [6] 王云霓.六盘山南坡典型森林的水文影响及其坡面尺度效应[D].北京:中国林业科学研究院,2015.
- [7] 王冬云,张卓文,苏开君,王光,雷云飞,林明磊,张培,钟庸.广州流溪河流域毛竹林的水文生态效应.浙江林学院学报,2008,25(1):37-41.
- [8] Horton R E. Rainfall Interception. Monthly Weather Review, 1919, 47(9): 603-623.
- [9] 王彦辉,于澎涛,徐德应,赵茂盛.林冠截留降雨模型转化和参数规律的初步研究.北京林业大学学报,1998,20(6):25-30.
- [10] 苏省.广东省森林生态状况动态分析及质量评价.林业科技开发,2014,28(1):1-6.
- [11] 朱丰华.广东省流域治理现状及发展趋势.中国环保产业,2016,(3):65-67.
- [12] Rutter A J, Kershaw K A, Robins P C, Morton, A J. A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. Agricultural Meteorology, 1971-1972, 9: 367-384.
- [13] Liu S G. A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies. Ecological Modelling, 1997, 99(2/3): 151-159.
- [14] Gash J H C, Morton A J. An application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetford Forest. Journal of Hydrology, 1978, 38(1/2): 49-58.
- [15] Gash J H C. An analytical model of rainfall interception by forests. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1979, 105(443): 43-55.
- [16] Aston A R. Rainfall interception by eight small trees. Journal of Hydrology, 1979, 42(3/4): 383-396.
- [17] Roo Ad, Wesseling C. G. Jetten V G, Ritsema Coen. LISEM: A physically-based hydrological and soil erosion model incorporated in a GIS. Application of geographic information systems in hydrology and water resources management, 1996, 235: 395-403.
- [18] 陈美婷.广东省土地生态安全预警初步研究[D].广州:中国科学院研究生院(广州地球化学研究所),2015.
- [19] 刘喻娟.广东省人工林资源现状分析与评价.林业调查规划,2017,42(5):58-63,72-72.
- [20] 宋文龙,杨胜天,温志群,蔡明勇,白晓辉,高芳.贵州典型森林群落植被冠层的酸雨淋溶特征及缓冲作用.环境科学学报,2010,30(1):15-23.
- [21] 何常清,薛建辉,吴永波,张雷燕.应用修正的 Gash 解析模型对岷江上游亚高山川滇高山栎林林冠截留的模拟.生态学报,2010,30(5):1125-1132.

- [22] 伍倩, 闫文德, 赵亮生, 邓湘雯, 宁晨, 项文化. 湖南会同杉木人工林林冠截留特征. 生态学报, 2016, 36(13): 4131-4140.
- [23] 黄进, 胡海波, 张家洋, 张金池. 北亚热带毛竹林林冠截留特征的研究. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2009, 33(2): 31-34.
- [24] 张家洋. 北亚热带次生竹林林冠截留过程研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007.
- [25] 马国飞, 满苏尔·沙比提. 托木尔峰自然保护区台兰河上游森林植被水源涵养功能. 水土保持学报, 2017, 31(3): 147-153.
- [26] 白雲, 李新通, 苏德, 杨巍, 曾以平, 万春. 井冈山国家级自然保护区杉木林冠层的截留模型. 水土保持通报, 2016, 36(2): 216-221.
- [27] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法(第二版). 北京: 科学出版社, 2013: 381-385.
- [28] 苏泳娴, 陈修治, 叶玉瑶, 吴旗韬, 张虹鸥, 黄宁生, 匡耀求. 基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理. 地理学报, 2013, 68(11): 1513-1526.
- [29] 黄珍珠, 张锦华, 时小军, 何健, 陈慧华. 全球变暖与广东气候带变化. 热带地理, 2008, 28(4): 302-305, 330-330.
- [30] 王志超, 许宇星, 竹万宽, 杜阿朋. 雷州半岛尾巨桉人工林树干液流对台风天气的响应. 林业科学研究, 2017, 30(4): 679-684.
- [31] 陈哲华, 苏晨辉, 刘旭, 谭开源. 广东省林业综合效益评价. 广东林业科技, 2015, 31(4): 106-111.
- [32] 张运宏. 广东多地域风景林下植被的群落特征分析. 绿色科技, 2016, (14): 17-18.
- [33] 温远光, 刘世荣. 我国主要森林生态系统类型降水截留规律的数量分析. 林业科学, 1995, 31(4): 289-298.
- [34] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 张立伟. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务. 生态学报, 2015, 35(15): 5191-5196.
- [35] 成晨. 重庆缙云山水源涵养林结构及功能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [36] 陈吉虎. 关于森林对降水截留过程的研究. 河南水利与南水北调, 2008, (12): 23-23, 29-29.
- [37] 卓丽, 苏德荣, 刘自学, 任云宇, 刘艺杉. 草坪型结缕草冠层截留性能试验研究. 生态学报, 2009, 29(2): 669-675.
- [38] 郑子成, 李廷轩, 张锡洲, 王永东, 林超文. 玉米植株冠层截留分异特征及其影响因素. 水土保持学报, 2012, 26(4): 208-211, 215-215.
- [39] 彭军超, 宫恩田. 广东省雨日与降水量的气候变化研究. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2010, 28(1): 157-160.