

基于 MOD16 产品的怒江流域中上游 蒸散发分布特征研究

范雪梅, 罗贤, 季漩, 李运刚, 黄江成

(云南大学亚洲国际河流中心/云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室, 云南 昆明 650091)

摘要: [目的] 研究怒江流域中上游蒸散发的空间分布特征, 为流域水资源合理开发及生态保护提供支撑。[方法] 利用气象站点实测降水资料, 验证 TRMM(tropical rainfall measuring mission) 3B43 产品在怒江流域中上游的精度, 进而对 MODIS(moderate-resolution imagn spectroradiometer) 全球陆地蒸散发产品 (MOD16) 在该流域的适用性进行检验。在此基础上, 探讨该流域蒸散发及产水量的空间分布特征。[结果] ① TRMM3B43 数据与站点实测月降水量相关系数 R 为 0.86, 在怒江流域中上游使用具有较好精度, MOD16 蒸散发量相对偏大, 但仍具有一定的适用性; ② 研究区多年平均蒸散发量为 489.4 mm, 蒸散发主要集中在 300~800 mm; ③ 降水量与蒸散发量的差值 ($P-E$) 与降水量 (P) 的空间分布格局相似, ($P-E$)/ P 在无植被地区较大 (为 0.33), 在植被覆盖区相对较小。[结论] 研究区多年平均蒸散发量空间分布差异较大, 沿河流呈现出低—高一低—高的变化规律; MOD16 产品具有覆盖范围广, 时空上连续等特点, 能够为缺资料地区蒸散发的相关研究提供相对可靠的数据支撑。

关键词: 蒸散发; MOD16; TRMM3B43; 青藏高原; 怒江流域中上游

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2019)02-0199-07

中图分类号: P426.2

文献参数: 范雪梅, 罗贤, 季漩, 等. 基于 MOD16 产品的怒江流域中上游蒸散发分布特征研究[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2):199-205. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.02.032; Fan Xuemei, Luo Xian, Ji Xuan, et al. Spatial distribution of evapotranspiration in middle and upper Nujiang River basin based on MOD16 products[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2):199-205.

Spatial Distribution of Evapotranspiration in Middle and Upper Nujiang River Basin Based on MOD16 Products

Fan Xuemei, Luo Xian, Ji Xuan, Li Yungang, Huang Jiangcheng

(Asian International Rivers Center of Yunnan University, Yunnan Key Laboratory of International Rivers and Transboundary Eco-security, Kunming, Yunnan 650091, China)

Abstract: [Objective] The spatial distribution characteristics were studied in order for rational utilization of water resources utilization and ecological protection in the middle and upper Nujiang River Basin. [Methods] Making use of observations from meteorological stations, the performance of TRMM(tropical rainfall measuring mission) 3B43 product in the middle and upper Nujiang River Basin was verified, and then the applicability of MOD16 (moderate-resolution imagn spectroradiometer) products were further examined. The spatial distribution characteristics of evapotranspiration and water yield were analyzed. [Results] ① At monthly scale, the correlation coefficient between TRMM 3B43 estimates and rain gauge observations was 0.86, indicating TRMM 3B43 data had good accuracy in the middle and upper Nujiang River Basin. The evapotranspiration obtained from MOD16 data was higher, but still had applicability. ② The mean annual evapotranspiration in the study area mainly ranged from 300 to 800 mm, and the regional mean value was 489.4 mm. ③ The spatial distribution of ($P-E$) was similar to that of P , while ($P-E$)/ P (0.33) in barren areas and smaller in vegetation-covered areas. [Conclusion] The spatial distribution of evapotranspiration was heterogeneous,

收稿日期: 2018-07-19

修回日期: 2018-10-17

资助项目: 国家自然科学基金项目“怒江流域中上游水文过程对土壤冻融循环变化的响应机制”(41601026), “怒江上游流域冰雪融水—径流过程及影响机制研究(41561003)”；云南省科技计划项目“气候变化驱动下怒江流域水文过程响应机制研究”(2017FB073)

第一作者: 范雪梅(1995—), 女(汉族), 湖北省襄阳市人, 硕士研究生, 研究方向为水文过程。E-mail: fanxuemei7@163.com。

通讯作者: 罗贤(1985—), 男(彝族), 云南省玉溪市人, 博士, 助理研究员, 主要从事水文学水资源方面的研究。E-mail: luoxian@ynu.edu.cn。

showing a low-high-low-high variation along the river. With widespread coverage and continuous observation, MOD16 products could provide reliable support for evapotranspiration research in lack-data watershed.

Keywords: evapotranspiration; MOD16; TRMM3B43; Tibetan Plateau; middle and upper Nujiang River basin

蒸散发是水文过程的重要环节之一,地表水分的收支情况在一定程度上影响着地理环境的组成与演变,研究蒸散发的分布规律及变化特征,对于探讨水文过程对气候变化的响应具有重要意义^[1]。由于地形、气候、植被等众多自然因素差异的存在,估算区域蒸散发一直是相关研究中的难题^[2]。遥感具有覆盖范围广、时空连续观测的特点,促进了蒸散发量估算由点尺度向面尺度推广,在获取地表实际蒸散发方面具有独特优势^[3-4]。青藏高原是亚洲主要大河的发源地,也是我国气候变化较为显著及突出的区域^[5]。近几十年来,青藏高原地区气温呈明显上升趋势,年平均增幅达 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ^[6-7];另一方面,青藏高原的蒸发皿蒸发量呈减小趋势,变化速率为 $-30.6\text{ mm}/10\text{ a}$ ^[8]。与全球大多数区域类似,气温增加,潜在蒸发量减小的“蒸发悖论”现象在青藏高原地区同样存在。由于地形及气象条件复杂、观测站点缺乏,开展青藏高原地区蒸散发分布及变化特征研究,是气候变化影响下区域水文过程变化研究的难点之一。怒江流域中上游主要位于青藏高原东南部,流域西藏段是西藏的第二大河流,其长度、流域面积及径流量仅次于雅鲁藏布江^[9]。近年来,怒江流域西藏段增温趋势明显^[10],气温增长速率达 $0.42\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ^[11-12]。一直以来,针对怒江流域尤其是中上游水文地理的有关研究相对较少,开展怒江流域中上游蒸散发量的空间分布特征分析,能够促进气候变化背景下,青藏高原东南部缺资料地区水量平衡分布规律的辨识。为此,本文利用怒江流域中上游及其周边地区气象站点实测降水资料,对 TRMM(tropical rainfall measuring mission)3B43 数据进行精度验证;基于水量平衡原理,结合 TRMM 数据及流量观测资料,对 MODIS(moderate-resolution imager spectroradiometer)全球陆地蒸散发产品(MOD16)在研究区的适用性进行评价;在此基础上,重点探讨研究区蒸散发及产水量的空间分布特性,为气候变化下的怒江流域中上游水资源合理开发利用及生态环境保护提供支撑。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

怒江—萨尔温江发源于青藏高原唐古拉山南麓,流经我国西藏、云南省,出境进入缅甸后称萨尔温江,干流全长 $3\ 673\text{ km}$,流域面积为 $3.25\times 10^5\text{ km}^2$ ^[13]。

在我国境内,怒江流域位于 $91^{\circ}13'—100^{\circ}15'\text{ E}$, $23^{\circ}5'—32^{\circ}48'\text{ N}$,呈南北狭长型,自西北向东南地势逐渐降低,流域面积为 $1.36\times 10^5\text{ km}^2$,干流全长 $2\ 013\text{ km}$ 。河源至嘉玉桥为上游,位于地势相对较高的青藏高原东南部,气候严寒,昼夜温差大,降水较为稀少,径流补给来源丰富,其中降水、冰雪融水及地下径流分别占 35% , 32% , 33% ;嘉玉桥至六库为流域的中游,地处高山峡谷广布的横断山区,气候垂直变化明显,降水较上游有所增加,是径流补给的主要来源;六库以下为下游,位于地势较低的云贵高原,气候温暖湿润,降水期集中,径流全部由降水补给^[9,13]。本文选取位于滇藏省界附近的贡山水文站($98^{\circ}40'\text{ E}$, $27^{\circ}43'\text{ N}$)以上流域作为研究区,研究区面积约为 $1.07\times 10^5\text{ km}^2$,占怒江流域在中国流域面积的 78.7% 。

1.2 数据来源

1.2.1 实测降水及径流数据 本研究采用的降水数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>),选取 1998—2016 年怒江流域中上游及其周边地区 17 个气象站点实测月降水量,用于 TRMM3B43 数据的验证,站点分布如图 1 所示。在流量数据方面,本研究收集到嘉玉桥站 2003—2006 年、贡山站 2000—2011 年各月流量观测资料,对研究区平均径流深进行计算。

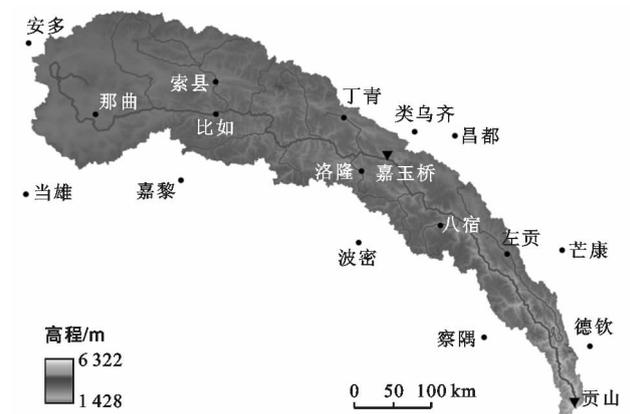


图 1 研究区地形及气象站、水文站分布

1.2.2 TRMM 数据 TRMM3B43 产品是 TRMM 卫星联合其他卫星及地面观测资料共同反演的降水产品,该产品首先订正 TRMM/TMI(microwave imager)资料,并结合 SSM/I(special sensor microwave imager)、AMSR-E(advanced microwave scanning radiometer-earth observing system)、AMSU-B(advanced microwave

sounding unit-B)资料估算降水,其次利用全球降水气候计划的红外降水估值订正微波降水,再将微波和红外资料联合估值,并融合地面雨量计数据,充分利用已有观测资料^[14],为无资料及缺资料地区的降水研究提供数据支撑^[15]。在自然环境复杂、观测站点缺乏的青藏高原地区,开展 TRMM 数据的适用性研究,表明 TRMM 数据能够较好地呈现青藏高原降水的时空分布格局及变化特征^[16-17]。本研究选用 1998—2016 年 TRMM3B43V7 数据(来源:https://disc.gsfc.nasa.gov),时间分辨率为 1 个月,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。将其与同期气象站点实测降水资料进行对比分析,以验证 TRMM3B43V7 数据在怒江流域中上游的精度,进而检验 MOD16 数据在怒江流域中上游的适用性,并明确该流域的蒸散发空间分布特征。

1.2.3 MODIS 蒸散发数据 MOD16 是 NASA 于 2011 年发布的全球陆地蒸散发产品数据,原理为 Mu 等基于 Penman-Monteith 公式在 2007 年的算法基础上得到的蒸散发算法,计算输入数据包括叶面积指数、反照率、植被覆盖度等遥感信息及气温、气压、相对湿度、辐射等气象资料,产品包含蒸散发(ET)、潜热通量(LE)、潜在蒸散发(PET)和潜在潜热通量(PLE)。通过全球通量塔台站的检验,MOD16 数据模拟精度可达 86%^[18-19]。MOD16 数据在时空上具有高分辨率、连续覆盖等特点,在全球得到了较为广泛的应用^[20]。目前,MOD16 数据已用于我国地表蒸散发的时空变化特征分析^[21-22],总体上具有一定的适用性,在站点资料稀缺的青藏高原地区,MOD16 数据能够较准确地呈现蒸散发的空间分布规律^[23]。本研究选用 2000—2011 年的 MOD16A2 数据(来源: http://files.ntsg.umt.edu),时间分辨率为 1 个月,空间分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 。结合收集到流量数据的序列情况,基于水量平衡原理,利用同期 TRMM3B43 数据和流量观测资料,分别对 MOD16A2 数据在研究区不同部分的适用性进行验证。

1.2.4 植被数据 根据 1:100 万中国植被图,对研究区植被类型分布情况进行划分,研究区植被类型以草甸和草本沼泽、灌丛和萌生矮林、针叶林、无植被为主,分别占研究区总面积的 54.6%,30.6%,7.5%和 6.6%。

1.3 研究方法

1.3.1 TRMM 数据检验 对 TRMM 数据的整体精度评价采用相关系数(R)、相对偏差(BIAS)、平均误差(ME)及平均绝对误差(MAE)4 个指标。

相关系数的计算方法为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中: n ——站点个数; x_i ——TRMM 降水量; \bar{x} ——TRMM 降水量的平均值; y_i ——站点实测降水量; \bar{y} ——站点实测降水量的平均值。 R 表示 TRMM 数据与站点实测数据的一致性,取值范围为 $[0, 1]$,其值越接近 1,表明 TRMM 数据与站点实测数据的一致性越好。

相对偏差的计算方法为:

$$\text{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{\sum_{i=1}^n y_i} \times 100\% \quad (2)$$

BIAS 表示 TRMM 降水与实测降水在数值上的偏离程度,BIAS 越接近 0,表明 TRMM 数据越精确。BIAS 为正值,表明 TRMM 降水高于实测降水,BIAS 为负值,表明 TRMM 降水低于实测降水。

平均误差及平均绝对误差的计算方法为:

$$\text{ME} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{n} \quad (3)$$

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \quad (4)$$

ME 和 MAE 表示 TRMM 数据与站点实测数据的误差,ME 和 MAE 的值越小则误差越小。

1.3.2 MOD16 数据检验 利用 TRMM 数据和径流深数据,基于水量平衡公式,对 MOD16 产品在研究区适用性进行评估。

$$P = E + R + \Delta S \quad (5)$$

式中: P ——年降水量(mm); E ——年蒸散发量(mm); R ——年径流深(mm); ΔS ——蓄水量的变化量(mm)。在多年平均的情况下,可以忽略流域蓄水量的变化^[24]。

2 遥感数据适用性分析

2.1 TRMM 数据精度验证

1998—2016 年研究区及周边地区站点实测降水量与对应栅格降水量的决定系数为 0.73,相关系数为 0.86,并通过了显著性水平为 0.01 的检验(图 2),相对偏差 BIAS 为 19.0%,平均误差 ME 为 10.2 mm,平均绝对误差 MAE 为 21.0 mm。总体而言,TRMM3B43V7 降水量略高于实测降水量,TRMM3B43V7 产品在研究区具有较好的精度。

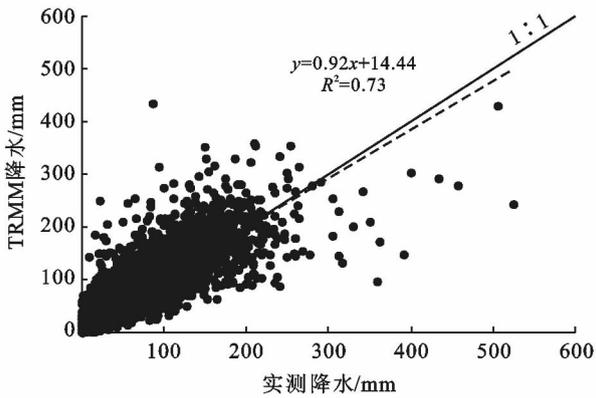


图 2 研究区 TRMM 降水与站点实测降水散点图

为全面分析 TRMM 产品在研究区的适用情况，

进一步对 17 个站点的实测降水量与对应栅格 TRMM 降水量分别进行相关分析(表 1)。TRMM 降水量与各站点实测降水量的相关系数较高,均通过了显著性水平为 0.01 的检验。上游各站点的相关系数大于 0.88,表明 TRMM 产品在上游地区精度较好;中游各站点的相关系数相对较低,其中贡山站的相关系数仅为 0.77,表明 TRMM 产品在中游的精度不如上游。上游位于高原湖盆宽谷区,地形起伏较小,中游地处横断山区,地形复杂多变,降水空间差异较大,故 TRMM 产品在怒江上游所得降水更接近实测降水。TRMM3B43V7 产品在研究区具有一定精度,本研究即采用 2000—2011 年 TRMM3B43V7 降水数据,结合流量观测资料对 MOD16 产品的适用性进行验证。

表 1 研究区 TRMM 降水与站点实测降水的相关系数(R)

台站	海拔/m	R	台站	海拔/m	R	台站	海拔/m	R
安多	4 800	0.93	类乌齐	3 810	0.96	左贡	3 780	0.85
那曲	4 507	0.96	昌都	3 306	0.95	芒康	3 870	0.95
当雄	4 200	0.93	嘉黎	4 489	0.94	察隅	2 328	0.79
索县	4 023	0.94	洛隆	3 640	0.88	德钦	3 319	0.89
比如	3 940	0.94	波密	2 736	0.79	贡山	1 583	0.77
丁青	3 873	0.96	八宿	3 260	0.83			

2.2 MOD16 数据精度验证

表 2 及图 3 为怒江流域中上游不同部分 TRMM 多年平均降水 P 与 MOD16 估算降水 ($E+R$) 的对比结果。从图 3 可以看出 TRMM 降水与 MOD16 估算降水较为吻合,总体上呈现较好的一致性。同时对比两者的散点图,表明 P 与 ($E+R$) 整体变化趋势较为一致(图 3),决定系数为 0.58,相关系数为 0.76,且通过了显著性水平为 0.01 的检验。进一步分析 MOD16 产品在流域不同部分的适用性,发现在嘉玉桥以上的部分精度较高,相对误差为 25%,而嘉玉桥至贡山的部分精度较低,利用 MOD16 产品所得蒸散发量相对偏大,这说明 MOD16 产品在地形起伏较大

的山区精度较差。对研究区整体而言,2000—2011 年,TRMM 多年平均降水量 P 为 682.9 mm,MOD16 多年平均蒸散发量 E 为 489.4 mm,多年平均径流深 R 为 396.7 mm,多年平均 ($E+R$) 为 886.1 mm,多年平均降水量 P 较 ($E+R$) 低 203.2 mm,在研究区利用 MOD16 产品所得蒸散发量整体偏大。本研究利用 MOD16 产品所得怒江中上游的蒸散发量介于 300~800 mm,与刘国伟^[25]所得青藏高原东南部年蒸散发量 500~800 mm 的结果较为一致。由此可见,MOD16 产品在怒江流域中上游具有一定的适用性,可利用 MOD16 数据分析研究区的蒸散发空间变化特征。

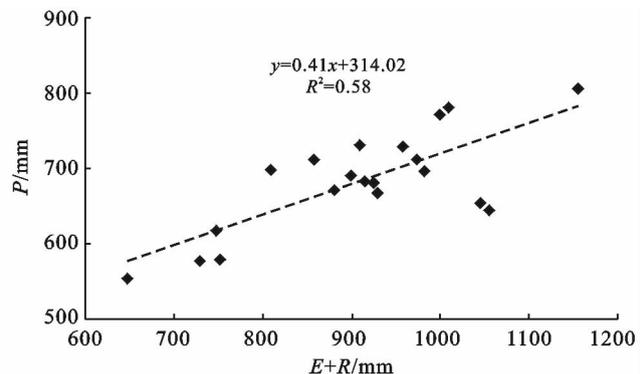
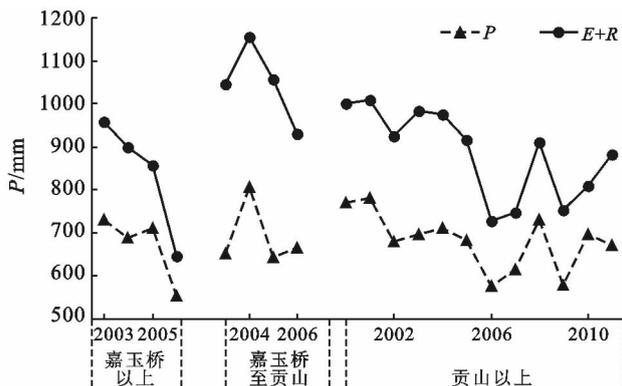


图 3 研究区不同部分 P 与 ($E+R$) 的比较

表 2 研究区不同部分多年平均 P 与 $(E+R)$ 比较

区域	P	$E+R$
嘉玉桥以上	671.2	840.4
嘉玉桥至贡山	692.5	1 030.2
贡山以上	682.9	886.1

3 怒江流域中上游水循环要素空间分布特征

3.1 降水空间分布特征

研究区年平均降水量为 682.9 mm,不同区域降水空间分布差异较大(图 4),河源那曲地区、中游洛隆至左贡地区降水量较小,上游比如至洛隆、中游贡山地区降水相对丰富。河源区年降水量低于 600 mm,源区海拔高,气候寒冷,且距印度洋水汽源较远,水汽在输送过程中逐渐损失;上游比如至洛隆地区降水量约为 700~900 mm,来自印度洋的西南暖湿气流沿雅鲁藏布江通道上溯,水汽在此集中,形成降水的高值区;中游洛隆至左贡降水量介于 500~700 mm,由于众多山脉阻隔,到达此处的水汽较少;中游贡山降水量约为 1 500 mm,贡山位于研究区偏南、横断山区相对偏西,受地形及大气环流影响,印度洋水汽沿横断山脉自南向北溯,同时水汽沿横断山脉西侧通道上溯至贡山地区,形成较为丰富的降水。

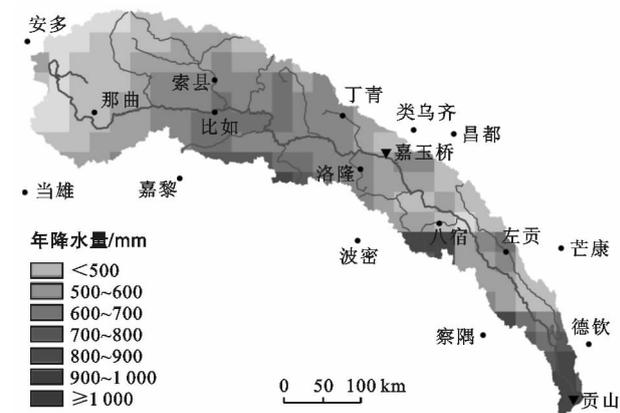


图 4 研究区降水空间分布

3.2 蒸散发空间分布特征

研究区年平均蒸散发量为 489.4 mm,蒸散发量多介于 300~800 mm,研究区蒸散发空间分布差异较大,与降水的空间分布类似,存在两个明显的高值区和两个低值区(图 5)。高值区分别位于上游比如至洛隆、中游贡山地区,低值区出现在河源、中游八宿至左贡地区,蒸散发沿河流呈现出低—高一低—高的变化规律。河源、八宿至左贡地区蒸散发量在 400 mm 以下,低于年平均值,由于降水较少,可供蒸散发的水分

有限;比如至洛隆、贡山地区蒸散发量约为 600~800 mm,该地区降水量较大,充足的水分可用于蒸散发。

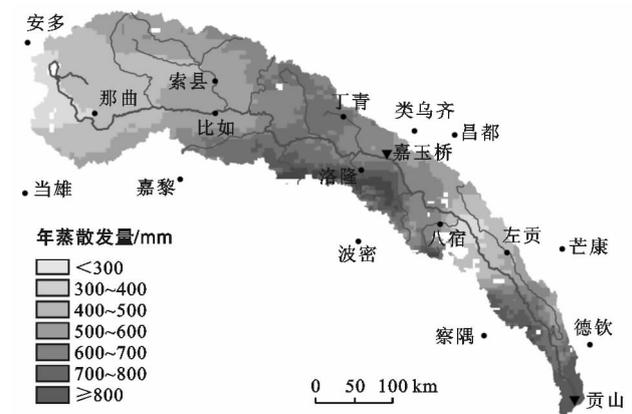


图 5 研究区蒸散发空间分布

杜军等^[26]应用实测气象资料对 1981—2010 年怒江西藏段的潜在蒸发量进行研究,发现怒江西藏段年平均潜在蒸发量为 870.1 mm,本研究采用 MOD16 产品所得年平均蒸散发量为 496.8 mm,供水条件是影响研究区蒸散发的重要因素之一。

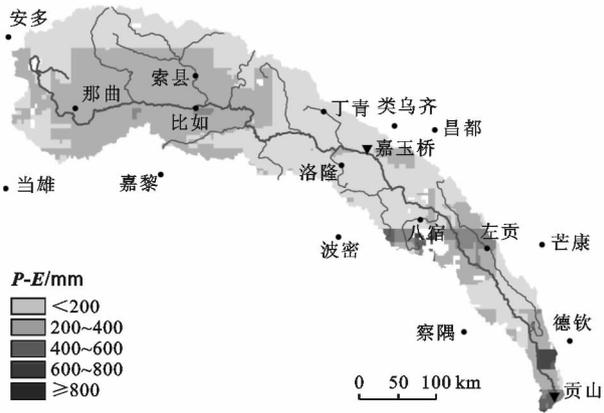
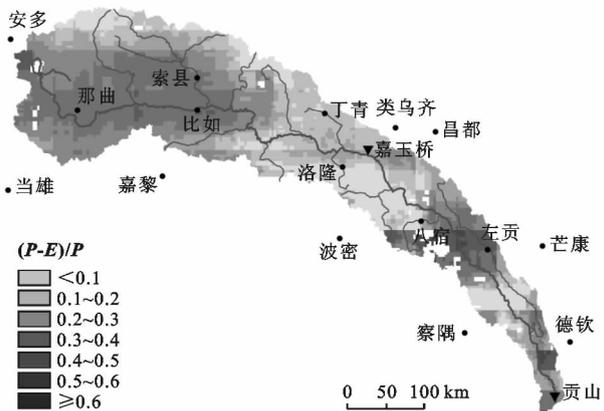
4 产水量空间分布特征

4.1 产水量空间分布特征

探究降水量与蒸散发量的差值($P-E$),以进一步评估研究区产水量的空间分布特征。研究区年平均($P-E$)为 193.5 mm, ($P-E$)空间分布如图 6 所示。整体来看,上游地区($P-E$)空间分布差异较小,多低于 400 mm,那曲至比如一带介于 200~400 mm。刘冬英等^[13]对怒江水资源特性进行分析,表明怒江上游大部分地区径流深介于 200~400 mm,本研究所得结果与其相符。研究区中游地处横断山区, ($P-E$)空间分布极不均匀,贡山地区年降水量约为 1 500 mm,蒸散发量介于 700~800 mm, ($P-E$)可达 600 mm 以上。对比研究区降水空间分布图(图 4),可知 ($P-E$)与降水的空间分布格局相似,研究区整体降水量偏小。

4.2 植被与 $(P-E)/P$ 的关系

研究区 $(P-E)/P$ 空间分布如图 7 所示, ($P-E)/P$ 与 $(P-E)$ 的空间分布基本一致。上游那曲至比如地区 $(P-E)/P$ 大于 0.4,比如至洛隆地区则低于 0.3;中游 $(P-E)/P$ 分布差异较大,洛隆至八宿地区 $(P-E)/P$ 在 0.3 以下,而左贡和贡山地区 $(P-E)/P$ 可达 0.6。研究区植被类型主要包括草甸和草本沼泽、灌丛和萌生矮林、针叶林、无植被等,植被分布如附图 5 所示。

图 6 研究区 $(P-E)$ 空间分布图 7 研究区 $(P-E)/P$ 空间分布

对研究区 2000—2011 年主要植被类型 $(P-E)/P$ 进行统计(表 3),经检验,草甸和草本沼泽与灌丛和萌生矮林的均值存在显著性差异,在 0.05 水平上差异显著。无植被地区 $(P-E)/P$ 最大,为 0.33,而植被覆盖区的 $(P-E)/P$ 相对较小。在无植被地区,裸地的水源涵养能力较差,降水易下渗形成壤中流和地下径流,故 $(P-E)/P$ 较高;在植被覆盖地区,植物能够在一定程度上截留降水,水分消耗于蒸散发,因此 $(P-E)/P$ 较无植被地区较低。

表 3 研究区不同植被类型降水及蒸散发特征

植被类型	面积/ 10^4 km^2	P / mm	E / mm	$(P-E)$ / mm	$(P-E)/P$
草甸和草本沼泽	5.8	660.0	472.3	187.7	0.28
灌丛和萌生矮林	3.2	701.0	521.8	179.3	0.26
针叶林	0.8	763.8	553.0	210.7	0.27
无植被	0.7	778.4	517.4	261.0	0.33

5 结论

(1) 利用气象站点实测降水资料,对 TRMM3B43

降水产品及 MOD16 蒸散发产品在怒江流域中上游的适用性进行评估,研究区及其周边地区 TRMM3B43 数据与站点实测月降水量 R 为 0.86, TRMM3B43 数据在怒江流域中上游具有较好的精度,MOD16 数据在怒江流域中上游的蒸散发量相对偏大,仍具有一定的适用性,可用于流域蒸散发分布特征的分析与研究。

(2) 基于遥感产品所得结果,怒江流域中上游多年平均蒸散发量为 489.4 mm,蒸散发空间分布差异较大,沿河流呈现出低—高一低—高的变化特征,流域 $(P-E)$ 与 P 的空间分布格局相似,具有明显的空间分布差异,无植被地区的 $(P-E)/P$ 为 0.33,植被覆盖区的 $(P-E)/P$ 相对较小。

(3) 由于自然条件的限制,获取青藏高原蒸散发相关数据较为困难,而 MOD16 产品具有覆盖范围广、时空上连续等特征,为蒸散发及产水量的空间分布特征分析提供了相对可靠的数据支撑,可用于资料缺乏的青藏高原地区水文过程研究。利用 MOD16 产品所得区域蒸散发存在一定的偏差,在使用时需予以综合考虑。

[参 考 文 献]

- [1] Jung M, Reichstein M, Ciais P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply[J]. Nature, 2010,467(7318):951-954.
- [2] Allen R G, Pereira L S, Howell T A, et al. Evapotranspiration information reporting (I): Factors governing measurement accuracy [J]. Agricultural Water Management, 2011,98(6):899-920.
- [3] Li Zhaoliang, Tang Ronglin, Wan Zhengming, et al. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data[J]. Sensors, 2009,9(5):3801-3853.
- [4] Chen Yang, Xia Jiangzhou, Liang Shunlin, et al. Comparison of satellite-based evapotranspiration models over terrestrial ecosystems in China[J]. Remote Sensing of Environment, 2014,140(140):279-293.
- [5] 冯松,汤懋苍,王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据[J]. 科学通报,1998,43(6):633-636.
- [6] 梁小文,杨梅学,万国宁,等. 青藏高原气温序列的均一性研究[J]. 冰川冻土,2015,37(2):275-285.
- [7] 郑然,李栋梁,蒋元春. 全球变暖背景下青藏高原气温变化的新特征[J]. 高原气象,2015,34(6):1531-1539.
- [8] Liu Xiaomang, Zheng Hongxing, Zhang Minghua, et al. Identification of dominant climate factor for pan evaporation trend in the Tibetan Plateau[J]. Journal of geographical sciences, 2011,21(4):594-608.
- [9] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏河流与湖泊

- [M]. 北京:科学出版社,1984.
- [10] 罗贤,何大明,季璇,等. 近 50 年怒江流域中上游枯季径流变化及其对气候变化的响应[J]. 地理科学,2016,36(1):107-113.
- [11] 杜军,翁海卿,袁雷,等. 近 40 年西藏怒江河谷盆地的气候特征及变化趋势[J]. 地理学报,2009,64(5):581-591.
- [12] 周刊社,杜军,袁雷,等. 西藏怒江流域高寒草甸气候生产潜力对气候变化的响应[J]. 草业学报,2010,64(5):17-24.
- [13] 刘冬英,沈燕舟,王政祥. 怒江流域水资源特性分析[J]. 人民长江,2008,39(17):64-66.
- [14] Huffman G J, Adler R F, Bolvin D T, et al. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. Journal of Hydrometeorology, 2007,8(1):38-55.
- [15] 谢红霞,刘旭星,隋兵,等. TRMM 降雨数据在湖南省长株潭地区的适用性[J]. 水土保持通报,2017,37(3):295-301.
- [16] 齐文文,张百平,庞宇,等. 基于 TRMM 数据的青藏高原降水的空间和季节分布特征[J]. 地理科学,2013,33(8):999-1005.
- [17] 程珂,朱祯,李铭,等. TRMM3B43 降水产品在西藏地区的精度检验和应用[J]. 水利水电技术,2014,45(1):44-46.
- [18] Mu Qiaozhen, Heinsch F A, Zhao Maosheng, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. Remote sensing of Environment, 2007,111(4):519-536.
- [19] Mu Qiaozhen, Zhao Maosheng, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. Remote Sensing of Environment, 2011,115(8):1781-1800.
- [20] 吴桂平,刘元波,赵晓松,等. 基于 MOD16 产品的鄱阳湖流域地表蒸散量时空分布特征[J]. 地理研究,2013,32(4):617-627.
- [21] 贺添,邵全琴. 基于 MOD16 产品的我国 2001—2010 年蒸散发时空格局变化分析[J]. 地球信息科学学报,2014,16(6):979-988.
- [22] 赫晓慧,梁冰洁,郭恒亮,等. 基于 MOD16 的北洛河流域蒸散发空间格局演变研究[J]. 水土保持通报,2017,37(1):177-182.
- [23] 宋璐璐. 青藏高原蒸散发时空变化特征研究[D]. 北京:中国科学院地理科学与资源研究所,2013.
- [24] 杨大文,杨汉波,雷慧闽. 流域水文学[M]. 北京:清华大学出版社,2014.
- [25] 刘国纬. 西藏高原的水文特征[J]. 水利学报,1992(5):1-8.
- [26] 杜军,房世波,唐小萍,等. 1981—2010 年西藏怒江流域潜在蒸发量的时空变化[J]. 气候变化研究进展,2012,8(1):35-42.

(上接第 198 页)

- [24] Pain G, Baudry J, Burel F. Land Pop: un outil d'étude de la structure spatiale des populations animales fragmentées [J]. Revue Internationale de Géomatique, 2000,10:89-106.
- [25] 陈利顶,傅伯杰,徐建英,等. 基于“源—汇”生态过程的景观格局识别方法:景观空间负荷对比指数[J]. 生态学报,2003,23(11):2406-2413.
- [26] 黎晓亚,马克明,傅伯杰,等. 区域生态安全格局:设计原则与方法[J]. 生态学报,2004,24(5):1055-1062.
- [27] 林勇,樊景凤,温泉,等. 生态红线划分的理论和技术[J]. 生态学报,2016,36(5):1244-1252.
- [28] 徐德琳,邹长新,徐梦佳,等. 基于生态保护红线的生态安全格局构建[J]. 生物多样性,2015,23(6):740-746.
- [29] 王洁,李锋,钱谊,等. 基于生态服务的城乡景观生态安全格局的构建[J]. 环境科学与技术,2012,35(11):199-204.
- [30] 叶玉瑶,苏泳娴,张虹鸥,等. 生态阻力面模型构建及其在城市扩展模拟中的应用[J]. 地理学报,2014,69(4):485-496.
- [31] 朱强,俞孔坚,李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度[J]. 生态学报,2005,25(9):2406-2412.
- [32] 李卫锋,王仰麟,彭建,等. 深圳市景观格局演变及其驱动因素分析[J]. 应用生态学报,2004,15(8):1403-1410.
- [33] 乌尼图,岳德鹏,张亦超,等. 基于 3S 技术的城乡区域生态节点的识别与分析[J]. 环境科学与技术,2014,37(2):184-189.
- [34] 陆禹,余济云,陈彩虹,等. 基于粒度反推法的景观生态安全格局优化:以海口市秀英区为例[J]. 生态学报,2015,35(19):6384-6393.