

基于 Budyko 理论的北京地区实际蒸散发估算及特征研究

黄俊雄¹, 韩丽¹, 许志兰¹, 李超^{1,2}

(1. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 为了探究近些年北京地区实际蒸散发的时空变化特征, 采用基于 Budyko 理论的傅抱璞经验模型, 对北京地区 1980-2016 年实际蒸散发进行了估算; 并根据 Mann-Kendall 趋势分析、相关分析等方法, 对研究区实际蒸散发的时间变化特征、空间格局以及影响因素进行了探讨; 为提高傅抱璞经验模型在研究区的适用性, 依据北京地区历史时期水文气象数据, 结合水量平衡法对该模型参数进行了校准和验证。结果表明: 优化参数后的经验模型在研究区具有较高的模拟精度, 且适用性较强; 北京地区多年实际蒸散发均值为 447 mm; 时间尺度上, 呈不显著的下降趋势; 空间上, 表现出明显的空间异质性, 其中, 蓟运河山区的蒸散发最大, 其次为潮白河流域东部; 实际蒸散发的这种时空变化特征与区域降水量密切相关。

关键词: 实际蒸散发; Budyko 理论; 时空变化; 水面蒸发; 北京地区

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)03-0001-07

Estimation and variation of actual evapotranspiration of Beijing region based on Budyko theory

HUANG Junxiong¹, HAN Li¹, XU Zhilan¹, LI Chao^{1,2}

(1. Beijing Institute of Water Science and Technology, Beijing 100048, China; 2. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: For the better understanding of the actual evapotranspiration (AET) of Beijing region from 1980 to 2016, the AET was estimated using the Budyko-based empirical model proposed by Fu Baopu, which excels at the estimation of AET at basin scale. The temporal and spatial variations of AET and its influencing factors were investigated using the Mann-Kendall test method and the correlation analysis. To improve the applicability of Fu Baopu model in the study area, the parameters of the model were calibrated and validated by the water-balance model together with the historical hydrometeorological data (e.g. monitored precipitation data, water surface evaporation data and runoff data). The simulation results show that this empirical model presents a high simulation accuracy and great applicability in estimating AET over Beijing region after parameter calibration. The annual mean AET of Beijing is 447 mm. At the temporal scale, the AET series from 1980 to 2016 shows a slightly decreasing trend for the whole study area. Great spatial heterogeneities are found with the largest value occurring in the mountainous area of Jiyun River Basin, followed by the east of Chaobai River Basin. Such temporal and spatial variations are highly correlated with the regional precipitation.

Key words: actual evapotranspiration (AET); Budyko theory; temporal and spatial variation; water surface evaporation; Beijing region

收稿日期: 2019-11-22; 修回日期: 2020-01-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(4173000223)

作者简介: 黄俊雄(1980-), 男, 湖北武汉人, 博士, 教授级高工, 硕士生导师, 研究方向为水文及水资源。

通讯作者: 韩丽(1981-), 女, 内蒙古巴彦淖尔人, 教授级高工, 硕士生导师, 研究方向为水文及水资源。

1 研究背景

蒸散发是水文循环中的重要组成部分,也是能量平衡的重要环节。蒸散发的准确估算对于农业生产、生态环境保护、水资源利用等方面都具有重要意义。受到多种因素的影响和制约,流域实际蒸散发量很难通过观测直接获取,常用的估算方法包括水文模型法、遥感反演法等^[1-4]。在应用过程中,水文模型往往结构复杂且需要较多的驱动数据,遥感反演技术又很难达到时间尺度的要求,且容易受到外界条件的干扰^[5],因此,寻求一种简单而实用的实际蒸散发估算手段一直是学者们研究的热点。基于流域水量和能量平衡原理的 Budyko 理论为实现这一目标提供了可能^[6-8]。

Budyko 理论认为,流域内蒸散发同时受到水量(降水)和能量(太阳辐射,通常以潜在蒸发来代替)的限制。通过综合考虑流域内降水、潜在蒸散发以及模型参数的关系,可以进行流域实际蒸散发的估算,该方法既具有一定的物理机制,计算又相对简单便捷。张丹等^[9]基于 Budyko 理论,采用全国 71 个典型流域的水文气象资料,分析了不同经验模型对蒸散发估算精度的影响;周君华等^[10]基于 Budyko 理论,采用傅抱璞经验模型对 1980-2010 年岷江流域实际蒸散进行了模拟;曹文旭等^[11]选取了 Budyko 理论中的 4 种经验模型来研究潮河流域水热耦合平衡关系。

本文基于 Budyko 理论框架,借助傅抱璞经验模型,综合考虑北京地区不同子流域山区和平原下垫面条件,分区域优选表征下垫面条件的模型参数,并验证该模型在研究区的适用性,进而依据该模型估算北京地区的实际蒸散发量并分析其时空变化特征,为进一步了解北京地区水文循环过程、探究流域需水和耗水情况提供科学依据。

2 研究区概况及数据资料

北京市毗邻天津市和河北省,介于东经 115.7°~117.4°、北纬 39.4°~41.6°之间,总面积约 1.64 × 10⁴ km²,其中平原和山区各占总面积的 38% 和 62%。气候为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候。年平均气温在 8~12℃^[12]。降水量适中,1956-2016 年多年平均降水量为 572 mm,是华北地区降雨量最丰富的地区之一。降水季节分配不均匀,7、8 月常有暴雨,汛期(6-9 月份)降水量占全年降水量 80% 以上。北京地区自西向东贯穿大清河、永

定河、北运河、潮白河和蓟运河五大水系,多发源于西北部山地,向东南流经平原地区,最后在海河汇入渤海(蓟运河除外)。永定河是最大的过境河流,潮白河是北京第二大河流。五大子流域地理位置示意图如图 1 所示。

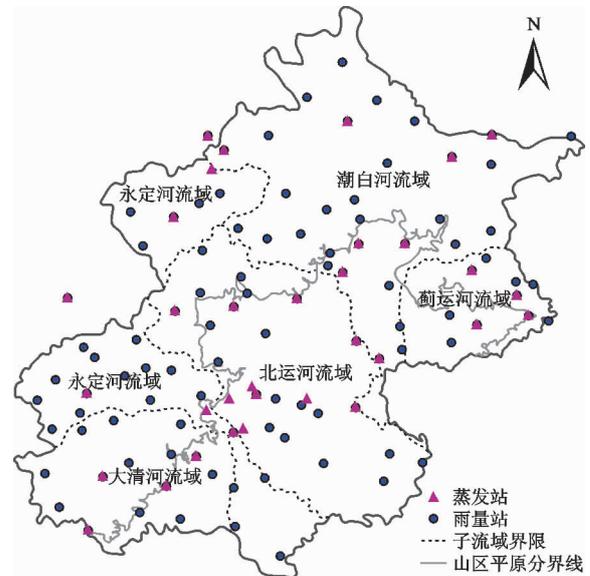


图 1 北京地区五大子流域以及蒸发站和雨量站位置示意图

收集的数据资料包括北京地区 34 个蒸发站 1980-2016 年逐年水面蒸发数据、105 个雨量站同期逐年降雨数据、五大子流域山区和平原 1980-2000 年逐年天然径流量数据,所有数据质量良好。各蒸发、雨量站点位置如图 1 所示。

3 研究方法

3.1 Budyko 理论及经验模型

根据 Budyko 理论,陆面长期平均蒸散发量主要由大气对陆面的水分供给以及大气蒸发需求之间的平衡关系决定;在年或多年时间尺度上,蒸散发的水分供给条件用降水量来表征,能量供给条件则由潜在蒸散发来表征;极端干旱时,所有降水量都将蒸发;极端湿润时,用来陆面蒸发的能量条件都会转化成潜热^[13]。满足以上边界条件的函数具有以下表达形式:

$$\frac{E}{P} = f\left(\frac{E_0}{P}\right) \quad (1)$$

$$\text{或} \quad \frac{E}{E_0} = f\left(\frac{P}{E_0}\right) \quad (2)$$

式中: E 为实际蒸散发, mm; E_0 为潜在蒸散发, mm; P 为降水量, mm。傅抱璞^[14]在 Budyko 理论的基础上,通过量纲分析和数学推导得出解析表达

式^[9](即傅抱璞经验模型):

$$\frac{E}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} - [1 + (\frac{E_0}{P})^\omega]^\frac{1}{\omega} \quad (3)$$

式中: ω 为模型参数,反映下垫面条件对蒸散发的作用, $\omega \geq 1$ 。

3.2 模型校准与验证

采用公式(3)计算傅抱璞模型参数,并采用试错法对其进行优化;其中,不同子流域山区和平原多年平均降水量根据已知雨量站降水数据通过算术平均法计算得到;潜在蒸散发量通常采用 Penman - Monteith(PM)方程进行估算^[8-9,15];通过对比 PM 方程的估算结果以及水面蒸发数据,可以发现,PM 估算结果高于水面蒸发数据,其 1980 - 2000 年多年平均值高出达 35%,显然,比较 PM 方法的估算结果,用水面蒸发量代替流域潜在蒸散发量结果更为可靠;另外,也有文献直接将蒸发皿蒸发量作为流域潜在蒸散发量处理^[16-17],因此,这里也直接采用蒸发皿观测的水面蒸发数据作为流域潜在蒸散发数据;根据收集到的径流资料年限长度,分别选取 1980 - 1994 年以及 1995 - 2000 年作为模型的校准期和验证期;最后,根据水量平衡法计算流域实际蒸散发量,从而对模型计算精度进行评价^[11,15-16]。流域水量平衡方程为:

$$E = P - R - \Delta W \quad (4)$$

式中: P 为多年平均流域降水量,mm; R 为多年平均径流深,mm; ΔW 为流域蓄水的变化量,mm,对于长时间尺度而言(年及以上),可认为流域蓄水量变化量为 0,则流域多年水量平衡方程为:

$$E = P - R \quad (5)$$

3.3 模型评价指标

采用相对误差(RE)和纳西效率系数(NSE)来评价该经验模型的模拟精度。 RE 和 NSE 计算公式如公式(6)和(7):

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^n (E_{sim,i} - E_{obs,i})}{\sum_{i=1}^n E_{obs,i}} \times 100\% \quad (6)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_{sim,i} - E_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (E_{obs,i} - \bar{E}_{obs,i})^2} \quad (7)$$

式中: $E_{sim,i}$ 、 $E_{obs,i}$ 分别为第 i 年模型模拟实际蒸散发量和水量平衡法计算的实际蒸散发量,mm; $\bar{E}_{obs,i}$ 为水量平衡法计算的实际蒸散发量的多年平均值,mm; RE 为蒸散发量模拟值与真实值之间的相对误差,其越接近于 0,表示模拟值越精确; NSE 为模型的有效性,其值越接近于 1,表示模拟精度越高。

4 结果分析与讨论

4.1 模型校准及验证

在校准期,根据不同子流域山区和平原多年平均径流量、降水量以及水面蒸散发量数据对傅抱璞经验模型中的参数 ω 进行优化,得到 ω 最优取值,基于最优参数取值的 Budyko 模型对北京地区各子流域实际蒸散发模拟精度如表 1 所示。由表 1 可以看出,不同流域平原和山区傅抱璞经验模型在校准期的 RE 小于 7%, NSE 均高于 0.7;在验证期,虽然模拟精度有所降低,但 RE 也均在 10% 内, NSE 也均高于 0.6。图 2 给出了模型校准期和验证期各子流域山区和平原实际蒸散发的变化曲线,由图 2 可以看出,无论是山区还是平原区,各子流域由流域水量平衡方程得到的蒸散发量曲线与傅抱璞经验模型得到的实际蒸散发量曲线拟合程度均较好,尤其是潮白河流域和永定河流域,两条曲线拟合程度更高。这说明经验模型参数 ω 经过优化后,模型能够更加真实地反映出研究区实际蒸散发的动态变化。

表 1 基于最优参数取值的 Budyko 模型对北京地区各子流域实际蒸散发模拟精度

流域	平原					山区				
	ω	校准期		验证期		ω	校准期		验证期	
		$RE/\%$	NSE	$RE/\%$	NSE		$RE/\%$	NSE	$RE/\%$	NSE
蓟运河	2.90	6.51	0.71	-9.23	0.64	2.87	2.22	0.77	-2.71	0.83
潮白河	2.72	0.05	0.89	2.31	0.97	2.35	0.77	0.72	-3.67	0.75
北运河	2.23	-2.05	0.84	9.64	0.81	2.22	-0.61	0.82	4.75	0.62
永定河	3.55	0.01	0.97	-0.12	0.95	3.20	0.02	0.97	0.03	0.94
大清河	2.40	-2.37	0.74	4.99	0.84	2.84	-0.84	0.89	1.36	0.83

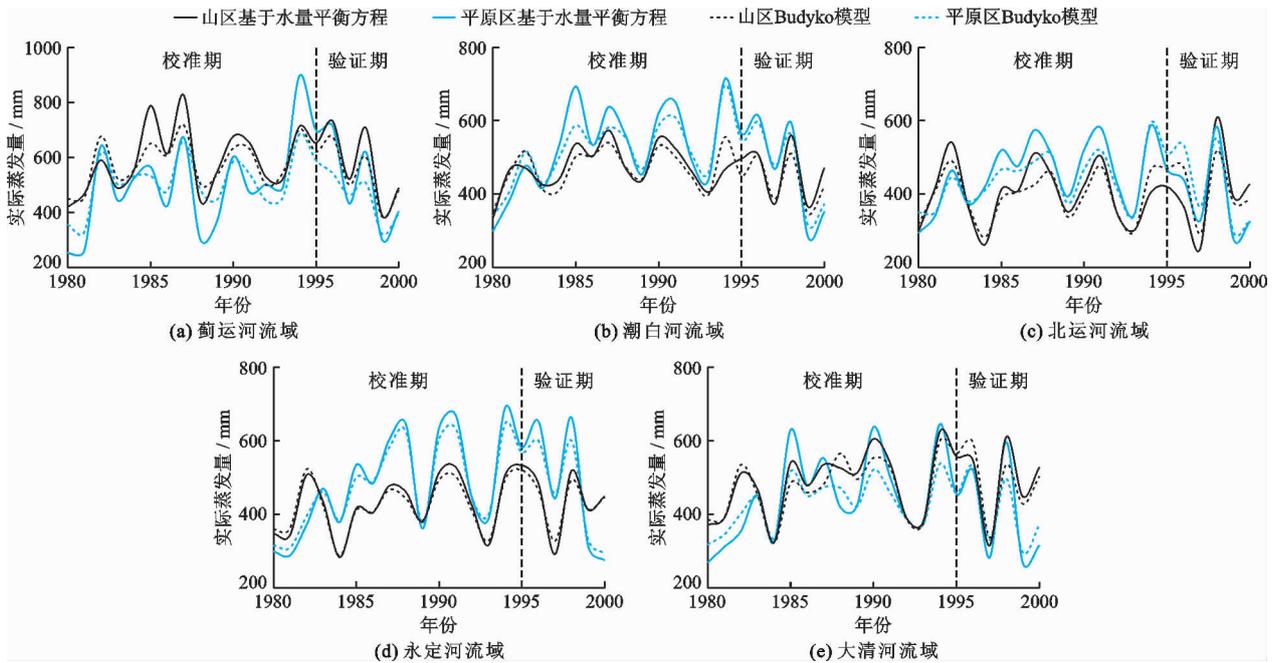


图2 基于水量平衡方程和 Budyko 模型的北京地区实际蒸散发变化曲线

4.2 实际蒸散发估算及其时间特征

通过公式(3)即傅抱璞经验模型及模型参数 ω 最优值,计算得到北京地区不同子流域山区和平原

1980-2016年的实际蒸散发序列。表2列出了北京地区不同时段各子流域及全地区的实际蒸散发量及其多年平均值。

表2 基于 Budyko 模型的北京地区不同时段各子流域及全流域多年平均实际蒸散发量

流域	1980s			1990s			2000s			2010-2016年			1980-2016年		
	平原	山区	全流域	平原	山区	全流域	平原	山区	全流域	平原	山区	全流域	平原	山区	全流域
蓟运河	494	567	530	513	579	546	442	508	475	487	538	512	484	549	516
潮白河	492	461	467	536	463	477	443	419	424	490	430	441	490	444	453
北运河	424	389	416	459	411	448	393	377	390	439	408	432	428	395	420
永定河	444	406	414	529	445	463	443	398	408	509	441	456	479	421	434
大清河	417	457	446	439	490	476	396	463	445	434	495	479	420	475	460
全流域	444	447	446	483	466	472	413	423	419	460	448	452	448	446	447

由表2可看出,整个北京地区多年平均实际蒸散发量447 mm,平原与山区接近。从不同年代看,1990s年代多年平均实际蒸散发量最大,全流域平均472 mm,2000s最小,平均417 mm,较1990s减少12%,较全流域多年平均值减少7%。根据已有数据计算得到1980-2016年北京地区多年平均降水量538 mm,潜在蒸发量991 mm,多年平均降水量小于潜在蒸发量,根据 Budyko 理论可知北京地区的实际蒸散发属于水分限制型,即该地区实际蒸散发的大小主要受水分供应条件的限制,因此研究区实际蒸散发的大小与降水条件密切相关。1990s是1980-2016年降水量最丰富的时期,年均降水量达577

mm,较多年平均值多7%,而2000s是1980-2016年降水量最少的时期,年均降水量不足500 mm,较多年平均值少将近9%;降水量的多少影响着研究区实际蒸散发量的大小。

表3给出了采用 Mann-Kendall 统计检验方法^[18]对研究区1980-2016年实际蒸散发序列进行趋势检验的结果,图3显示了趋势检验中倾斜度的空间分布。由表3和图3可知,所有序列的变化趋势均未通过0.05显著性检验(0.05显著性水平下Z的临界值为1.96,若计算的Z值小于1.96,则说明该序列的变化趋势在0.05显著性水平下不显著),但整体来看,永定河流域、北运河流域和大清河流域

的实际蒸散发序列对应的 Z 值为正,表示这些实际蒸散发序列具有上升趋势,潮白河流域、蓟运河流域对应的 Z 值为负,表示其实际蒸散发序列具有下降趋势;从趋势变化强度看,永定河平原实际蒸散发序列升幅最大,其次是永定河山区、大清河山区、北运河平原;潮白河山区实际蒸散发序列降幅最大,其次是蓟运河流域、蓟运河平原、潮白河平原(图 3(a));整个北京市实际蒸散发序列具有不显著下降趋势,降幅为 0.48 mm/a 。

比较同期降水量序列的 Mann - Kendall 趋势检验结果(表 3)及倾斜度的空间分布(图 3(b))可以看出,各子流域实际蒸散发序列的趋势变化与降水序列的趋势变化基本同向,呈现较强的一致性,即降水量呈现下降趋势的区域,实际蒸散发也基本呈现下降趋势,反之亦然。但除受降水条件影响外,近些年来,由于北京地区区域性大环境绿化生态工程建设(包括山区和平原)的实施,包括太行山绿化工程、天然林保护工程、退耕还林工程、京津风沙源治理工程、废弃矿上植被恢复工程的建设^[19],增加了区域植被覆盖面积,因而也会对流域实际蒸散发量具有一定的影响。

表 3 北京地区 1980 - 2016 年实际蒸散发序列和降水量序列 Mann - Kendall 趋势检验的 Z 统计量值

流域	实际蒸散发量		降雨量	
	平原	山区	平原	山区
蓟运河	-0.88	-1.27	-0.64	0.01
潮白河	-0.64	-1.61	0.30	-0.27
北运河	0.38	0.14	0.72	1.03
永定河	1.03	0.41	1.32	0.54
大清河	0.12	0.75	0.64	1.11
全地区	-0.43	0.61		

4.3 实际蒸散发空间特征

1980 - 2016 年北京地区多年平均实际蒸散发空间分布见图 4。由图 4 可看出,北京地区多年平均实际蒸散发量具有明显的空间差异性。蓟运河流域、潮白河流域东部多年平均实际蒸散发量最大;蓟运河流域实际蒸散发量达 516 mm ,其中山区达 549 mm 。这一方面与该区域较强的降水量有关,蓟运河流域是北京地区降水量最多的区域,1980 - 2016 年山区多年平均降水量 701 mm ,平原 624 mm ,潮白河流域山区多年平均降水量 592 mm ,平原 617 mm ,比整个北京地区多年平均降水量高出 $10\% \sim 30\%$;另

外,该区域有华北地区第二大水库 - 密云水库,水库的大面积水体使得其实际蒸散发量也比周围地区要高。永定河流域山区、北运河流域山区多年平均实际蒸散发量最小,分别为 421 和 395 mm ,这两个流域从山区到平原,多年平均实际蒸散发量有逐渐增加趋势;从降水条件看,永定河山区多年平均降水量 490 mm ,是整个北京地区降水量最少的区域,北运河山区多年平均降水量 548 mm ,也不及北京地区的多年平均降水量,较少的降水量导致该区域实际蒸散发量也偏少;另外,山区气温相对偏低,一定程度上也可能限制植被蒸腾以及水分蒸发。

4.4 实际蒸散发影响因素分析

流域实际蒸散发受供水条件、能量条件、动力条件、下垫面条件的共同作用,其机理比较复杂。这里用降水量来表征供水条件^[20],图 5 给出了北京地区实际蒸散发和降水量之间相关性的散点图。图 5 显示,实际蒸散发与降水量具有良好的正相关关系,即实际蒸散发会随着降水的增加而增加,随着降水的减少而减少,二者的相关系数达到 0.95 以上;且根据 Budyko 理论分析得知,北京地区实际蒸散发属于水分限制型,降水是主要的水分输入变量,决定该地区实际蒸散发的大小以及可利用水分的多少。

除供水条件外,能量条件、动力条件等也对流域实际蒸散发的大小产生影响。由此,选取北京地区北京气象站 1980 - 2016 年年降水量、平均气温、最高气温、最低气温、平均风速、日照时数、平均相对湿度 7 项气象因子以及水面蒸发的实测数据,来表征影响实际蒸散发的能量条件和动力条件,通过计算各气象因子与流域实际蒸散发序列的相关系数,进一步分析各影响因素与流域实际蒸散发的相关关系,结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出,流域实际蒸散发除与降水量这一水分因子具有极强的正相关性外,与其他因子的相关系数均较小,与气温具有微弱的正相关关系,与风速、日照时数和水面蒸发具有微弱的负相关关系。气温决定水分的蒸发和升华,同时影响植被的蒸腾作用,所以气温是影响流域实际蒸散发的重要因子。一般情况下,气温越高,太阳辐射可转化为蒸散当量的数值就越高,实际蒸散发量就越大。风速、日照时数、水面蒸发与实际蒸散发呈负相关,说明它们的变化趋势与实际蒸散发的变化趋势不一致。理论上,日照时数与蒸散发具有正相关性,即日照时数越长,太阳净辐射值便越大,蒸散过程中的能量供给就越充分,蒸散发量也会越大,但实际上,流域实际

蒸散发受到多种气象因子之间相互作用及其综合影响的结果,因而与气象条件往往呈现出复杂的关系

特征。通过以上分析可知,研究区供水条件(主要是降水量)是影响其实际蒸散发的主导因素。

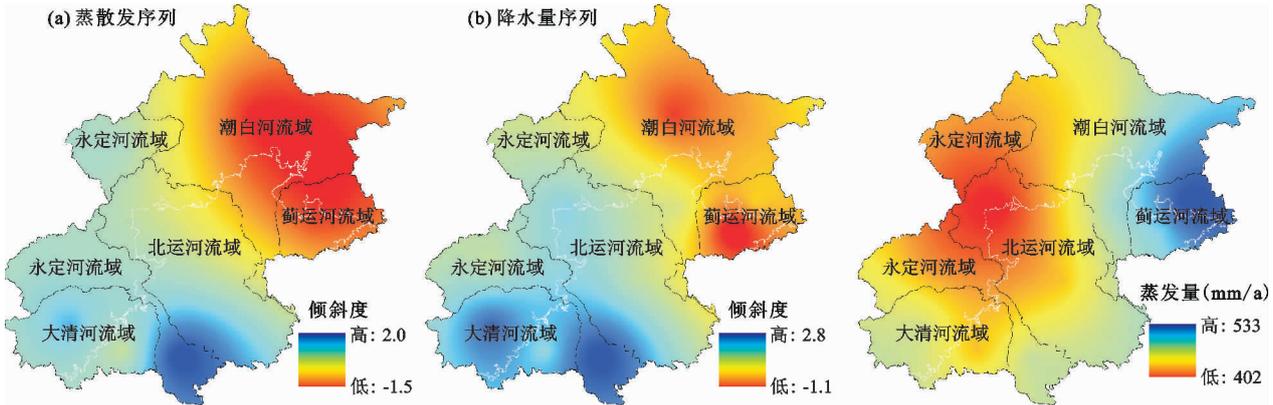


图3 北京地区1980-2016年实际蒸散发序列和降水序列M-K趋势中倾斜度空间分布

图4 1980-2016年北京地区多年平均实际蒸发量空间分布

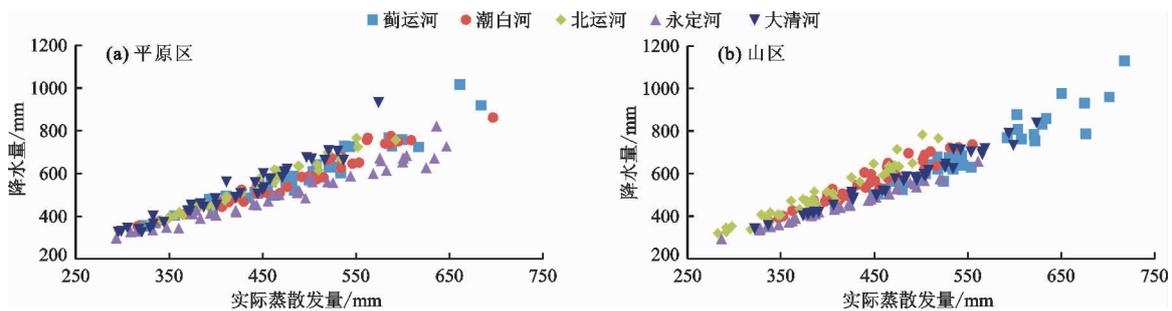


图5 1980-2016年北京地区各子流域实际蒸散发序列与降水量序列相关性散点图

表4 北京地区实际蒸散发与各气象要素的Pearson相关系数

降水量	平均风速	平均气温	最高气温	最低气温	平均相对湿度	日照时数	水面蒸发
0.98	-0.13	0.08	0.07	0.09	0.02	-0.26	-0.24

5 结论

选用基于Budyko理论的傅抱璞经验模型对北京地区1980-2016年实际蒸散发进行了估算,并对实际蒸散发的时空分布特征进行了分析。主要结论如下:

(1)下垫面参数优选后的傅抱璞经验模型对北京地区实际蒸散发的模拟精度较高,模型可以对研究区实际蒸散发进行良好的估算。

(2)北京地区多年平均实际蒸散发量为447 mm,1990s最大,2000s最小;1980-2016年研究区实际蒸散发序列整体呈现不显著下降趋势;空间上表现出明显的空间差异性,蓟运河流域多年平均实际蒸发量最大,其次是潮白河流域东部;永定河流域山区、北运河流域山区多年平均实际蒸发量最小;研究区实际蒸散发的这种时空差异与区域降水量的多

少密切相关。

(3)研究区实际蒸散发与降水量具有很强的正相关关系,与风速、日照时数、水面蒸发呈微弱的负相关,说明该地区实际蒸散发的变化趋势与降水量的变化趋势保持良好的一致性,供水条件(主要是降水)是影响该地区实际蒸散发的主导因素。

参考文献:

- [1] 张小琳,王卫光,陈曙光,等. 基于HBV模型的实际蒸散发估算模型评估[J]. 水电能源科学,2015,33(2):15-18+41.
- [2] 张戈,夏建新,王树东. 基于多源数据的黑河流域日尺度蒸散发量模拟[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(6):33-38.
- [3] 于辉,代鹏超,张金燕,等. 基于能量平衡算法的精河流域绿洲蒸散发时空变化模拟[J]. 干旱地区农业研究,2018,36(4):289-296.

- [4] 尹剑, 欧照凡, 付强, 等. 区域尺度蒸散发遥感估算——反演与数据同化研究进展[J]. 地理科学, 2018, 38(3): 448-456.
- [5] 赵玲玲, 夏军, 许崇育, 等. 水文循环模拟中蒸散发估算方法综述[J]. 地理学报, 2013, 68(1): 127-136.
- [6] ZHANG L, DAWES W R, WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale [J]. Water Resources Research, 2001, 37(3): 701-708.
- [7] GAO Xuerui, SUN Miao, ZHAO Qi, et al. Actual ET modelling based on the Budyko framework and the sustainability of vegetation water use in the loess plateau [J]. Science of The Total Environment. 2017, 579: 1550-1559.
- [8] 李鸿雁, 薛丽君, 王世界, 等. 基于水热耦合平衡理论的嫩江流域蒸散发估算[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 47-53.
- [9] 张丹, 梁康, 聂茸, 等. 基于 Budyko 假设的流域蒸散发估算及其对气候与下垫面的敏感性分析[J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1140-1148.
- [10] 周君华, 尹铎皓, 范云鹤, 等. 基于 Budyko 假设的岷江流域实际蒸散发模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(1): 107-112.
- [11] 曹文旭, 张志强, 查同刚, 等. 基于 Budyko 假设的潮河流域气候和植被变化对实际蒸散发的影响研究[J]. 生态学报, 2018, 38(16): 5750-5758.
- [12] 文哲. 1983-2012年北京市降水时空变化特征分析[J]. 农村经济与科技, 2017, 28(4): 15-17+22.
- [13] 孙福宝, 杨大文, 刘志雨, 等. 基于 Budyko 假设的黄河流域水热耦合平衡规律研究[J]. 水利学报, 2007, 38(4): 409-416.
- [14] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. 大气科学, 1981, 5(1): 23-31.
- [15] 张静, 刘国庆, 宋小燕, 等. Budyko 假设对松花江流域实际蒸散发的模拟研究[J]. 水文, 2019, 39(2): 22-27.
- [16] 栗铭, 陈喜. 基于 Budyko 假设的海河流域蒸散发量和径流量估算研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(6): 107-111.
- [17] 赵娜娜, 王贺年, 于一雷, 等. 基于 Budyko 假设的若尔盖流域径流变化归因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 21-16.
- [18] 周园园, 师长兴, 范小黎, 等. 国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1361-1369.
- [19] 贾宝全. 基于 TM 卫星影像数据的北京市植被变化及其原因分析[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1654-1666.
- [20] 范伶俐, 张光亚. 广东实际蒸散发与潜在蒸散发的关系研究[J]. 广东海洋大学学报, 2013, 33(3): 71-77.

喜 讯

《水资源与水工程学报》被中国科学引文数据库(Chinese Science Citation Database, 简称 CSCD)收录为 2019-2020 年度来源期刊(核心库); 2008-2020 年连续 13 年被中国科学技术信息研究所评为中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)。