

1960–2009年横断山区潜在蒸发量时空变化

朱国锋¹, 何元庆^{1,2}, 蒲 焘², 李宗省¹, 王旭峰¹, 贾文雄³, 辛惠娟¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000;

2. 兰州大学西部环境与气候变化研究院, 兰州 730000;

3. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730000)

摘要:以横断山区20个气象站1960–2009年逐日气象数据为基础,应用1998年FAO修正的Penman-Monteith模型分析了横断山区潜在蒸发量的变化,在ArcGIS环境下通过样条插值法分析了潜在蒸发量变化的时空分异,并对影响潜在蒸发量变化的气象因素进行了讨论,结果表明:年潜在蒸发量自20世纪60年代中期以来呈波动减小趋势,20世纪80年代中期之后减小趋势更加明显,2000–2009年呈增加趋势。潜在蒸发量的年际变化倾向率为 -0.17 mm a^{-1} ,从空间分布来看,北部、中部、南部都呈减少趋势,倾向率由北向南逐渐减小。从季节来看,秋季和冬季潜在蒸发量呈增加趋势,春季和夏季呈减小趋势,春季减小趋势大于夏季,秋季增加趋势大于冬季。气温上升、风速和日照时数的降低是横断山区潜在蒸发量减少的主导因素,风速和日照时数的下降导致春季和夏季潜在蒸发量减小,气温上升导致秋季和冬季潜在蒸发量增加。

关键词:潜在蒸发量;横断山区;样条插值法;Penman-Monteith模型;时空变化

1 引言

获取区域潜在蒸发量的直接方法是蒸发池观测,但进行大面积和高密度的蒸发池观测难以实现,因此潜在蒸发量空间分布的估算模拟一直是气候学和水文学研究的热点之一,准确地估算蒸散发量对全球气候变化背景下水文响应研究及水资源评估等具有重要意义^[1-5]。目前估算潜在蒸散发量的方法大体可分为5种^[6-7]:彭曼蒙蒂斯组合法(Penman-Monteith combination)、温度估计法(Temperature-Based)、辐射能量法(Radiation-Based)、质量传导法(Mass-Transfer)和水平衡法(Water Budget method)。在估算潜在蒸散发的方法中,FAO于1998年修正的Penman-Monteith公式能够反映气候要素的综合影响,适用于不同气候类型区潜在蒸散发量计算及气候变化情景下水文水资源响应研究^[8-10],它从能量平衡和空气动力学理论出发,采用水汽压、净辐射和在一定温度条件下的空气干燥度以及风速来确定潜在蒸散发量,物理学意义明确^[11]。

横断山位于青藏高原东南缘,是我国第一、二阶梯的过渡地带,对周边区域乃至我国中、

收稿日期: 2011-03-28; 修订日期: 2011-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971019); 国家重点基础研究发展(973) 计划(2007CB411501); 国家自然科学基金基础人才培养基金冰川学冻土学特殊学科点(J0630966); 冰冻圈科学国家重点实验室自主课题; 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部博士资助项目”(O828A11001); 中国科学院研究生科技创新与社会实践资助专项; 国家自然科学基金项目(90511007; 40801028) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40971019; National Basic Research Program of China, No.2007CB411501; Project for Incubation of Specialists in Glaciology and Geocryology of National Natural Science Foundation of China, No.J0630966; the Foundation from The State Key Laboratory of Cryosphere Science; West Light Foundation of China's Academy of Sciences, No.O828A11001; The CAS Special Grant for Postgraduate Research, Innovation and Practice; National Natural Science Foundation of China, No.90511007; No.40801028]

作者简介: 朱国锋 (1983-), 男, 甘肃平凉人, 博士研究生, 主要从事寒旱区水文与水资源研究。

E-mail: guofeng_zhu@yahoo.cn

西部地区气候和生态环境有着深刻的影响^[12]。近 100 年来我国地面气温上升 0.4~0.8℃,近 50 年来降水量整体呈减少趋势^[13]。理论上说,气温升高会引起地表和水面蒸发增强,但有研究表明,在气候变暖背景下全球大部分地区的蒸发皿蒸发量却呈明显减少趋势^[14-17]。对于潜在蒸发量减少的原因有不同观点,普遍认为蒸发量的减小与太阳辐射、相对湿度和风速有关^[14, 17-19]。近年,对横断山山区气候变化的趋势和特征进行了许多研究,但研究主要限于温度、降水和径流等气候和水文常规要素单因子分析方面^[20-23]。本文应用横断山区 20 个气象站(图 1)1961-2009 年实测数据,分析该区域气候变化背景下潜在蒸发量的时空变化特征,为该区域开展水文模拟研究和生态环境的系统研究积累基础资料。



图 1 横断山区气象站位置

Fig. 1 Location of meteorological stations in the Hengduan Mountains

2 数据与研究方法

2.1 数据基础

以实测资料的连续性和气象站空间分布为依据选取横断山区 20 个气象站,以 1960-2009 年的日平均气温、日最高气温、日最低气温、日照时数、日平均相对湿度、日平均风速等为基础资料计算潜在蒸发量。气象资料来自于中国气象局国家气象信息中心 (<http://www.nmic.gov.cn/>)。根据纬度位置对气象站进行了区域划分,丁青、石渠、若尔盖、德格、甘孜、松潘、马尔康属横断山北部;小金、新龙、稻城、康定、木里、九龙、越西属于中部;丽江、华坪、大理、德钦、西昌、盐源属南部。分别计算出各气象站的日潜在蒸发量,然后进行春季、夏季、秋季、冬季、雨季、干季、年潜在蒸发量的分析。季节的划分采用气象季节,即 3-5 月为春季,6-8 月为夏季,9-11 月为秋季,12-2 月为冬季;5-10 月为雨季,11 月-翌年 4 月为干季;海拔大于 3000 m 的气象站代表高海拔地区,小于 3000 m 的代表低海拔地区。

2.2 研究方法

2.2.1 Penman-Monteith 模型 世界粮农组织 (FAO) 1998 年修正的 Penman-Monteith 模型计算公式如式 (1)-(9)^[24-25]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \tag{1}$$

式中: ET_0 为潜在蒸发量,单位为 mm/d; Rn 为净辐射,单位为 MJ/(m²·d); G 为土壤热通量,单位为 MJ/(m²·d); γ 为干湿常数,单位为 kPa/°C; Δ 为饱和水汽压曲线斜率,单位为 kPa/°C; U_2 为 2 m 高处的风速,单位为 m/s; e_s 为平均饱和水汽压,单位为 kPa; e_a 为实际水汽压,单位为 kPa; T 为平均气温,单位为 °C。

$$Rn = (1 - a) \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a - Q \left(\frac{T_{\max,k}^4 - T_{\min,k}^4}{2} \right) (0.56 - 0.08 \sqrt{e_a}) \left(0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right) \tag{2}$$

式中: R_a 为大气顶层的太阳辐射,单位为 MJ/(m²·d); N 为最大日照时数,单位为 h; n 为实际日照时数,单位为 h; Q 为波尔兹曼常数 (4.903×10⁻⁹ MJ/(K⁴·m²·d)); $T_{\max,k}$ 为最高绝对气

温,K; T_{min} , K 为最低绝对气温,单位为K; a_s 为云全部遮盖下($n=0$)大气外界辐射到达地面的分量; b_s 为晴天($n=N$)大气外界辐射到达地面的分量; a 为地表反射度^[10,24],取值0.23; a_s 、 b_s 分别取值0.207、0.725。

$$G=0.14(T_i-T_{i-1})$$

(3)

式中: T_i 为第*i*月的平均气温, T_{i-1} 为第*i*-1月的平均气温。

$$\gamma=\frac{C_pP}{\xi\lambda}=\frac{1.013\times10^{-3}p}{0.622\lambda}$$

(4)

式中: $p=101.0\left(\frac{293-0.0065h}{293}\right)^{5.26}$, p 为大气压,单位:kPa; $\lambda=2.501-0.002361T$, λ 为蒸发的潜热系数,其中*T*为平均气温,单位为℃; C_p 为标准大气压下的特定热量值; $\xi=0.622$, ξ 为水蒸气 and 干空气的分子重量比; h 为海拔高度,单位为m。

$$\Delta=\frac{4096\left[0.6108\exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right)\right]}{(T+237.3)^2}$$

(5)

式中: T 为平均气温,单位为℃。

平均饱和水汽压的计算使用公式:

$$e_s=\frac{e^0(T_{max})+e^0(T_{min})}{2}$$

(6)

式中:

$$e^0(T_{max})=0.6108\exp\left(\frac{17.27T_{max}}{T_{max}+237.3}\right);e^0(T_{min})=0.6108\exp\left(\frac{17.27T_{min}}{T_{min}+237.3}\right)$$

其中, T_{max} 为最高绝对气温,单位为℃; T_{min} 为最低绝对气温,单位为℃。

实际水汽压的计算:

$$e_a=\frac{Rh\times e_s}{100}$$

(7)

式中: Rh 代表相对湿度。

$$R_a=\frac{24(60)}{\pi}G_{sc}d_r\left(\omega_s\sin(\phi)\sin(\delta)+\cos(\phi)\cos(\delta)\sin(\omega_s)\right)$$

(8)

式中: $G_{sc}=0.0820\text{ (MJm}^{-2}\text{min}^{-1}\text{)}$; d_r 表示日地距离订正; ω_s 表示日落时角(弧度); ϕ 表示纬度(弧度); δ 代表太阳高度角(弧度)。

$$N=\frac{24}{\pi}\omega_s$$

(9)

式中: ω_s 表示日落时角(弧度)。

2.2.2 Spline插值法 Spline插值法能够在空间插值时准确地通过实测样点拟合出连续光滑的表面,其优点是样条函数易操作,计算量小,不需要对空间方差的结构做预先估计,也不需要做统计假设,当表面很平滑时,也不会降低精度。为了验证其是否适用于研究区,在研究区选取17个气象站(11个插值站,6个验证站)对IDW法、Kriging法和Spline法做了验证,研究证实IDW法、Kriging法和Spline法与计算值都有较强的相关性(表1),IDW法($r=0.966,a<0.01$);Kriging法($r=0.967,a<0.01$);Spline法($r=0.969,a<0.01$),Spline法与计算值相关性最强,但是与实测值相比整体偏高(表2)。

由于横断山区气象站大多位于人类容易到达的相对低海拔和地势较平坦地区,而这些地区恰恰是潜在蒸发量相对较高的区域,而选择验证

表 1 潜在蒸发量计算值与不同插值法插值结果相关性分析
Tab. 1 Correlation analysis of calculated value and interpolation value
by different interpolation methods

潜在蒸发量	Penman-Monteith 模型计算值	IDW法 插值结果	Spline法 插值结果	Kriging法 插值结果
Penman-Monteith模型计算值	1	0.966 (**)	0.969 (**)	0.967 (**)
IDW法插值结果		1	0.986 (**)	0.988 (**)
Spline法插值结果			1	0.995 (**)
Kriging法插值结果				1

表 2 横断山区部分气象站年潜在蒸发量不同插值方法误差

Tab. 2 Error of different interpolation methods about annual potential evapotranspiration (mm)

气象站	年潜在蒸发量	IDW 法插值误差	Kriging 法插值误差	Spline 法插值误差	Spline 法修正后误差
石渠站	619.0	30.7	10.2	62.5	-4.1
甘孜站	698.5	5.9	-14.4	24.9	-42.3
马尔康站	601.9	28.5	30.9	79.1	12.8
木里站	789.4	47.2	38.4	64.9	-1.7
九龙站	745.6	-1.1	15.5	41.5	-25.4
西昌站	765.6	59.4	55.9	60.8	-5.8
平均绝对误差		28.8	27.5	55.6	15.3

气象站时则考虑了气象站的空间分异和对特殊地形的代表性,适当选取了部分海拔较高的站点,所以对验证站的插值结果相对于计算值出现了整体偏高的现象。通过回归方程($y = -67.56 + 1.016x$)修正后最大误差为6%,平均绝对误差为2%,误差较小(表2)。

Spline法表达式为^[26-27]:

$$Z = \sum_{i=1}^n a_i R(a_i) + T(x,y)$$

(10)

式中: Z 为气象要素的预测值, n 为参与插值的实测站点数, a_i 是一系列线性方程解所确定的系数, b_i 是估测点到第*i*点的距离, $R(a_i)$ 和 $T(x,y)$ 表达式如下:

$$R(a_i) = \frac{\frac{b^2}{4} \left[\ln \left[\frac{b}{2\pi} \right] + c - 1 \right] + d^2 \left[k_0 \left[\frac{b}{d} \right] + c + \ln \left[\frac{b}{2\pi} \right] \right]}{2\pi}$$

$$T(x,y) = f_1 + f_2x + f_3y$$

(11)

式中: b^2 为权重系数, b 为已知点与采样点之间的距离, k_0 为改正后的贝塞尔函数, c 为常数, f 为线性方程的系数。

气象要素的变化趋势采用一次线性方程表示:

$$Y = a_0 + a_1t$$

(12)

式中: Y 为气象要素, t 为时间(本文为1960-2009年); a_1 为线性趋势项, a_1 的系数为正,则表明是增量,反之亦然。

3 结果与分析

3.1 多年平均潜在蒸发量的空间分布

横断山地区多年平均年潜在蒸发量在245.3~909.0 mm之间(图2),纬度差异明显(表3、图2),自南向北潜在蒸发量逐渐减小。潜在蒸发量高值区出现在南部的大凉山、玉龙雪山、锦屏山一带,低值区出现在横断山北缘和中部大雪山、沙鲁里山、宁静山北部一带。南部年潜在蒸发量在411.3~909.0 mm之间,平均为737.8 mm;中部平均为711.7 mm;北部地区平均为612.4 mm;区域内高海拔地区潜在蒸发量低于低海拔地区,海拔3000 m以上的地区潜在蒸发量在521.6~881.6 mm之间,平均为629.7 mm;3000 m以下潜在蒸发量在482.2~1061.9 mm之间,平均为713.5 mm。

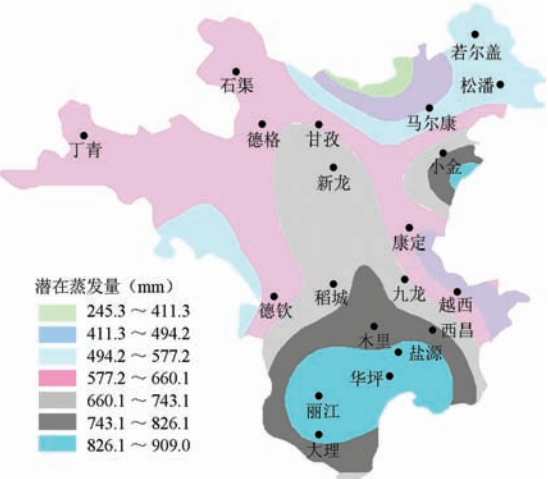


图2 1960-2009年横断山区年均潜在蒸发量插值
Fig. 2 Annual potential evapotranspiration average interpolation in Hengduan Mountains during 1960-2009

潜在蒸发量等值区域在经向上表现为沿纵向山脉向南北延伸,在纬向上从南至北整体上呈递减趋势(图2),这是因

为区域内纵向山体发育,季风通道南北贯通,东西受到巨大山体的屏障作用,地形通过影响降水、气温、风速等气候因素进而影响到了潜在蒸发量的空间分布。

春季、夏季和秋季潜在蒸发量与年潜在蒸发量的空间分布基本一致,都表现为潜在蒸发量由南向北逐渐减少(表3);春季、夏季、秋季和冬季分别占年潜在蒸发量的24%、31%、29%、16%。干季潜在蒸发量由南向北逐渐减少,雨季潜在蒸发量占全年总蒸发量的69.1%,与干季不同的是,雨季横断山中部潜在蒸发量高于南部(表3)。高海拔地区春季、夏季、秋季、冬季的潜在蒸发量分别为142.4 mm、228.2 mm、190.2 mm、89.4 mm,低海拔地区分别为186.0 mm、231.0 mm、205.3 mm、117.6 mm,各个季节均是高海拔地区潜在蒸发量低于低海拔地区,冬春季尤其明显。

横断山地区潜在蒸发量递减幅度存在明显的空间差异(图3),南部的玉龙雪山和锦屏山一带、中部沙鲁里山和大雪山之间的广阔地带潜在蒸发量减少幅度较大,50年来平均减小幅度为 0.21 mm a^{-1} ,横断山北缘地带、太白山北部和锦屏山北部,潜在蒸发量减少幅度较小,减少幅度约为 0.15 mm a^{-1} ,横断山区中部大雪山、沙鲁里山、宁静山一带形成一个潜在蒸发量明显减小带,西南部大凉山、锦屏山、玉龙雪山一带形成第二个潜在蒸发量明显减小地带。春季潜在蒸发量倾向率空间变化与年潜在蒸发量变化空间变化比较相似(图3),负高倾向率中心与年负高倾向率中心基本相同,但是潜在蒸发量负高倾向率的区域较年倾向率插值图大。夏季(图3),除了原有的横断山中部大雪山、沙鲁里山、宁静山一带和西南部大凉山、锦屏山、玉龙雪山一带外,横断山中部沙鲁里山和大雪山之间形成了一个狭长的潜在蒸发量负倾向率地带,使夏季潜在蒸发量负倾向率的高值区南北贯通,同时中部和北部潜在蒸发量负倾向率的区域明显扩大,东至岷江,西至怒江的广大地区都成为潜在蒸发量负倾向率高值区。秋季潜在蒸发量整体呈增加趋势(图3),除南部玉龙雪山、哈巴雪山一带潜在蒸发量减少外,中部地区潜在蒸发量略有增加,西南部和北部地区潜在蒸发量明显增加。与其他季节相比,冬季倾向率空间分异非常明显(图3),中部潜在蒸发量增加不明显,南部玉龙雪山地区和锦屏山地区形成了两个潜在蒸发量小幅增加的区域,其余的广大地区,潜在蒸发量增加均较为明显。

3.2 潜在蒸发量的年代际变化

横断山区在20世纪60年代、90年代和2000-2005年潜在蒸发量偏低,20世纪70年代、80年代和2005-2009年偏高(图4)。60年代至80年代横断山北部和中部春季潜在蒸发量变化趋势不明显,1990-2009年呈明显减少趋势,南部60年代至今一直呈较明显的减少趋势;中部和北部地区夏季潜在蒸发量在60年代偏低,60年代至70年代中期呈增加趋势,70年代中期以后呈减少趋势,南部地区60年代至80年代减少趋势不明显,1992年前后发生了突变,潜在蒸发量急剧减少,60年代至80年代平均值比1990-2009年高14.73 mm;秋季和冬季整个横断山区潜在蒸发量都呈现出增加趋势,2000-2009年秋季潜在蒸发量比多年平均值高16.54 mm,冬季高5.79 mm,这与横断山区年、春季、夏季潜在蒸发量变化呈相反的趋势。

潜在蒸发量的年代际变化表现出明显的区域差异(图4),20世纪60年代横断山北部呈小幅增加趋势、中部先减少后增加、南部呈减少趋势;20世纪70年代北部和南部先剧烈减少后趋缓,中部呈明显的连续减少趋势,70年代末期略有增加;80年代中部和北部都呈减少趋

表3 1960–2009年横断山区潜在蒸发量空间分布

Tab. 3 Distribution of potential evapotranspiration in Hengduan Mountains during 1960–2009

	春季平均	夏季平均	秋季平均	冬季平均	雨季平均	干季平均	多年平均
北部	127.2	229	182.9	72.7	423	189.6	612.6
中部	178.3	229.3	194.8	109.2	441.9	269.8	711.7
南部	205.4	192.2	223.7	142.3	399.5	338.3	737.8
横断山区	510.9	650.5	601.4	324.2	1264.4	797.7	2062.1

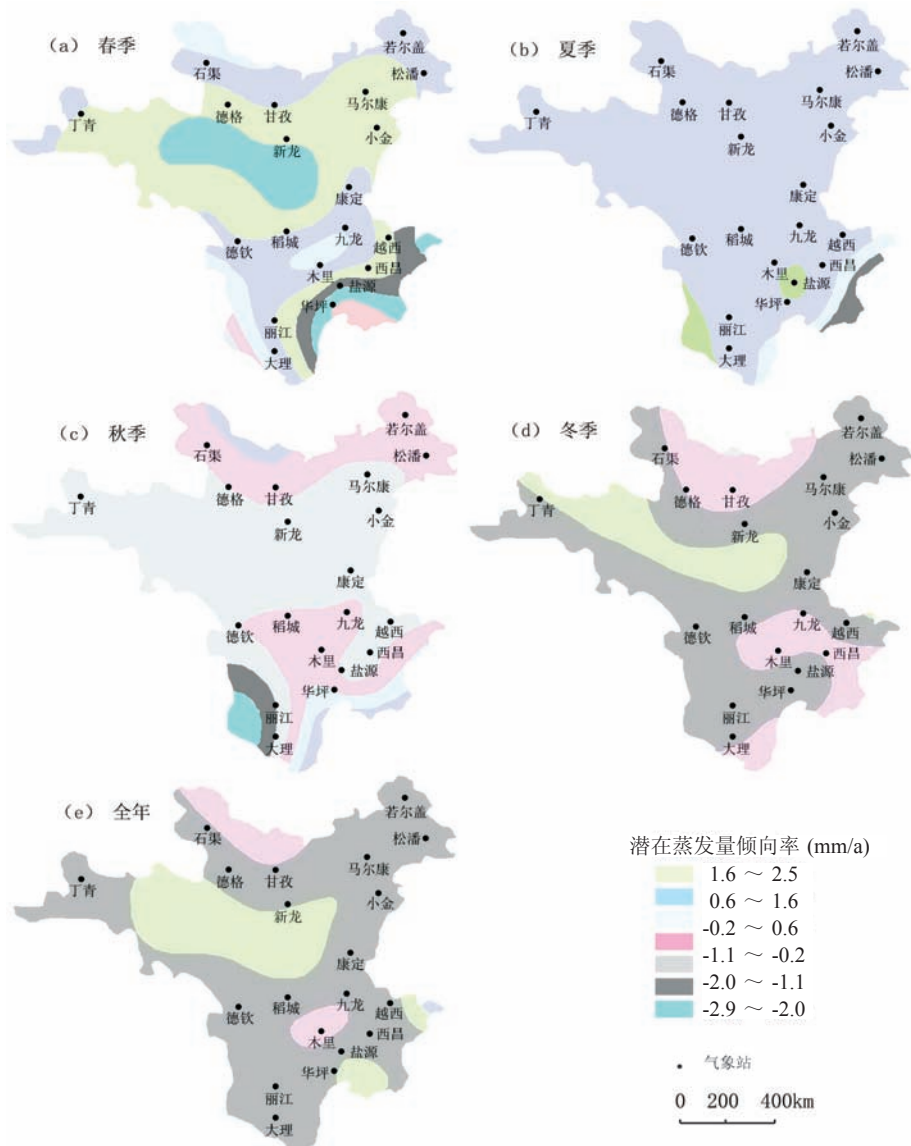


图3 1960-2009年横断山区潜在蒸发量变化倾向率插值

Fig. 3 Potential evapotranspiration tendency interpolation in Hengduan Mountains during 1960-2009

势,南部略有增加;90年代整个横断山区变化趋势一致,都以减少为主;2000-2009年整个横断山区潜在蒸发量转而呈增加趋势。

3.3 潜在蒸发量的年际变化

近50年来横断山区年均潜在蒸发量呈现出明显减少趋势(图4),北部、中部和南部的年均潜在蒸发量倾向率分别为 -0.17 mm a^{-1} 、 -0.14 mm a^{-1} 、 -0.21 mm a^{-1} 。减少趋势存在一定的区域差异,北部经历了1960-1972年的增加之后,1972-1987年基本稳定,1987-2000年急剧减少,2000-2009年波动增加,中部变化与北部类似。与北部和中部不同,南部潜在蒸发量在1960-1971年代经历了一个较明显的减少过程,1971-2009年,变化趋势与北部和中部基本一致。春季气温由北向南的倾向率依次为 -1.3 mm a^{-1} 、 -1.26 mm a^{-1} 和 -1.85 mm a^{-1} ,横断山北部和中部春季潜在蒸发量表现出1960-1970年增加,1970-2000年减少,2000-2009年开始缓慢增加;南部降低趋势比北部和中部明显,1960年至2000年波动减少,2000-2009年开始缓慢

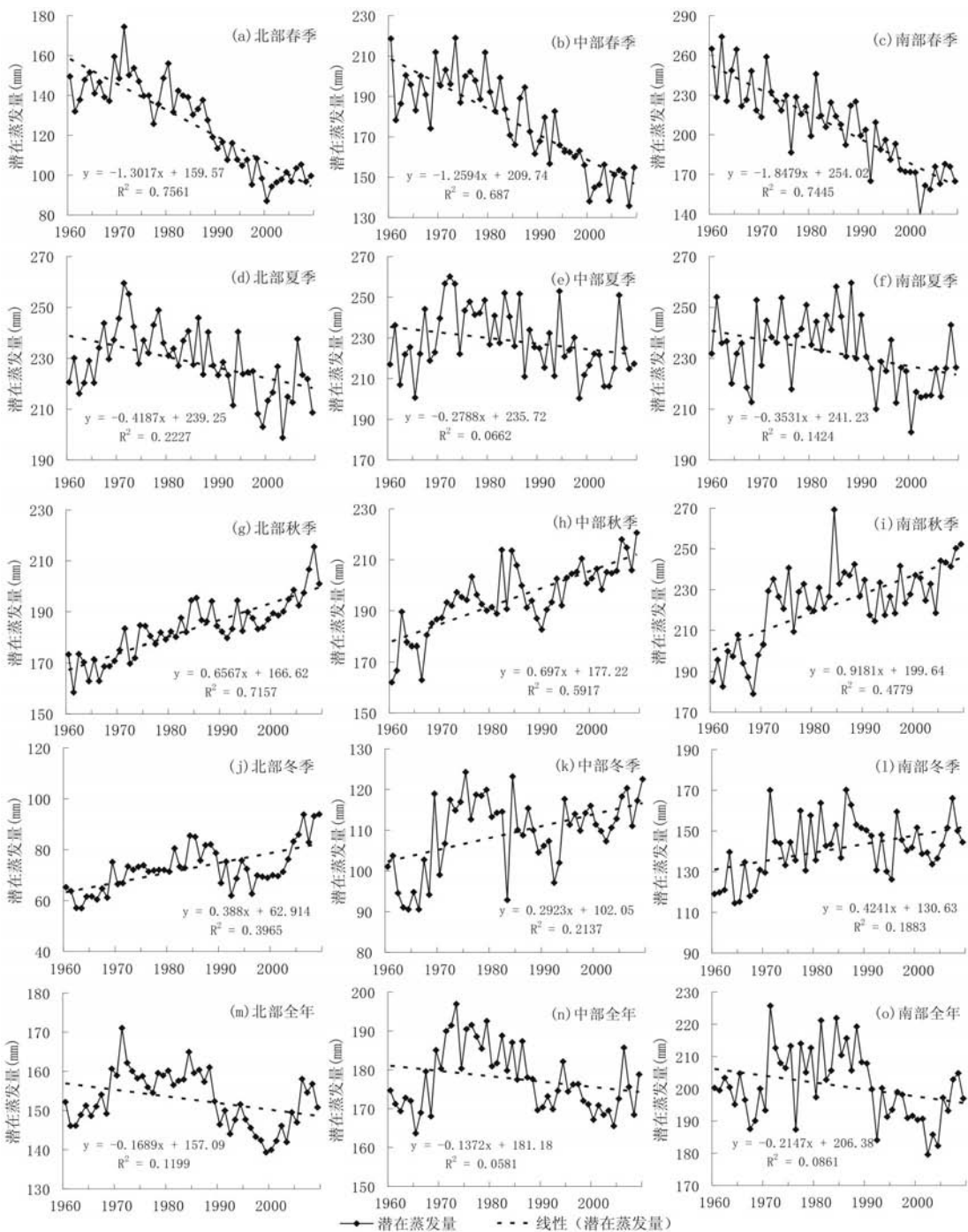


图4 1960-2009年横断山区潜在蒸发量年际变化

Fig. 4 Interannual changes of potential evapotranspiration in Hengduan Mountains during 1960-2009

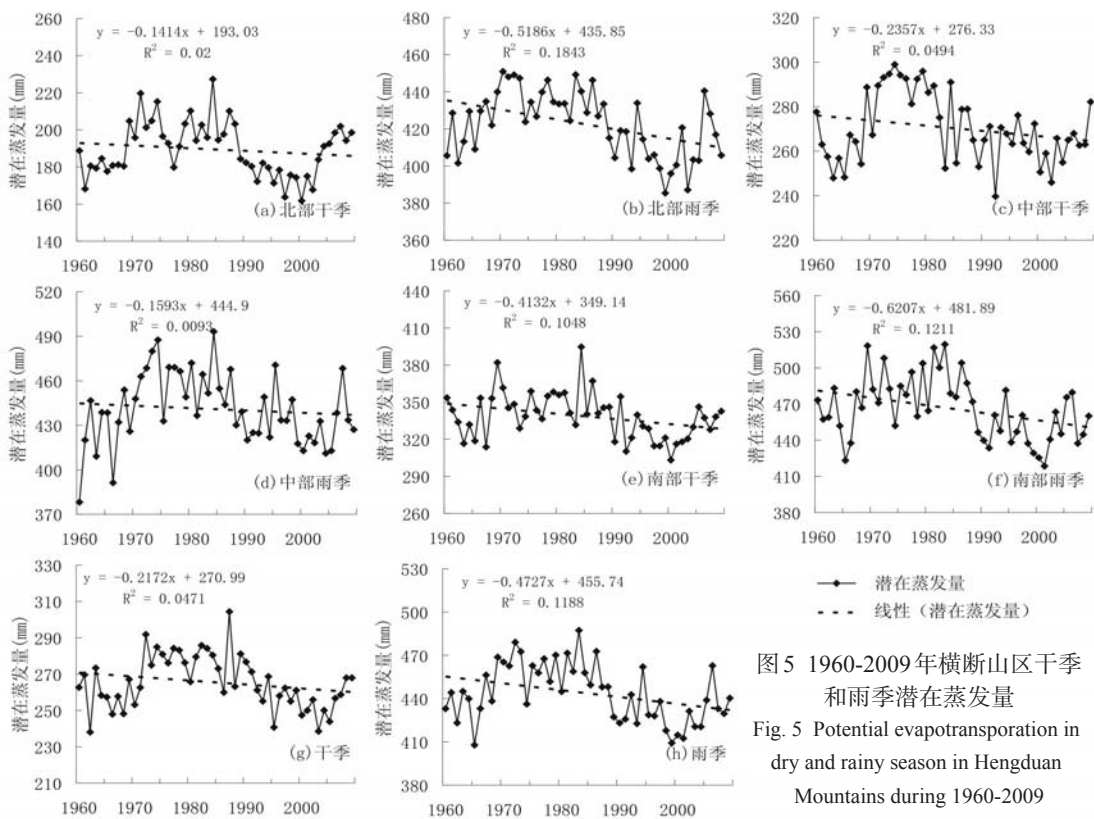
增加。夏季潜在蒸发量变化趋势的差异性较大,倾向率由北向南依次为 -0.41 mm a^{-1} 、 -0.29 mm a^{-1} 和 -0.35 mm a^{-1} 。1960-1972年北部和中部呈增加趋势,南部呈减少趋势,1972-1990年北部和中部呈减少趋势,南部基本稳定,1990-2000年,北部和中部波动减少,南部剧烈减少,2000-2009年,整个横断山区夏季潜在蒸发量转而增加。秋季潜在蒸发量呈现出较强的一致

性,北部、中部和南部的倾向率分别为 0.66 mm a^{-1} 、 0.69 mm a^{-1} 和 0.91 mm a^{-1} ,秋季是横断山区潜在蒸发量增加幅度最大的季节,北部、中部和南部在近50年来一直呈波动增加的趋势。冬季潜在蒸发量的变化趋势差异性较为明显,潜在蒸发量由北向南增加幅度依次为 0.39 mm a^{-1} 、 0.29 mm a^{-1} 、 0.42 mm a^{-1} ,在过去的50年整体都呈现增加趋势,不同的是中部的增加趋势在20世纪70年代中期放缓,北部和南部潜在蒸发量的增加趋势20世纪80年代中期放缓,北部2000-2009年潜在蒸发量明显增加。横断山区北部、中部、南部和年潜在蒸发量倾向率均表现出较为明显的变化趋势,潜在蒸发量变化的强烈程度依次为春季>秋季>冬季>夏季,说明横断山区在全球变暖背景下春季、秋季、冬季敏感性强于夏季。分析发现,潜在蒸发量在年代际变化上表现出较为一致的变化规律,在年际变化上较为复杂,这表明横断山区气候变化一方面符合全球气候按纬度分异的规律,另一方面也反映了全球变暖背景下山区气候变化的复杂性。

3.4 雨季与干季的年际和年代际空间变化

3.4.1 干季与雨季潜在蒸发量的年际变化 横断山区干季(图5)北部、中部和南部的潜在蒸发量倾向率分别为 -0.14 mm a^{-1} 、 -0.23 mm a^{-1} 、 -0.41 mm a^{-1} ,潜在蒸发量变化趋势的一致性较强,整体上来看,1960-1971年为波动增加阶段,1971-2002年波动减少,2003-2009年波动增加;南部潜在蒸发量减少最为明显,其次为中部,北部较为缓和。雨季(图5)北部、中部和南部的潜在蒸发量倾向率分别为 -0.51 mm a^{-1} 、 -0.15 mm a^{-1} 、 -0.62 mm a^{-1} ,南部潜在蒸发量减少最为明显,和干季不同的是雨季北部潜在蒸发量减少比中部更加剧烈,1960-1972年为波动增加阶段,1972-2000年为减少阶段,2001-2009年波动增加。

3.4.2 干季与雨季潜在蒸发量的年代际变化 雨季(图5)横断山区北部潜在蒸发量展现出逐年代递减的态势,干季(图5)北部60年代至70年代为负距平,70年代至90年代为正距平



平,1990-2000年为负距平,2000-2009年为正距平,中部和南部表现出与北部相似的特征;北部减弱趋势不明显,总体上负距平时段越向南负距平值大,正距平时段越向北正距平值越大,反映出干季越向南部潜在蒸发量减小趋势越明显。雨季北部潜在蒸发量在70年代至90年代为正距平,其余时段为负距平,中部和南部与此基本一致,但是在横断山中部负距平时段负距平水平明显高于北部和南部,潜在蒸发量减弱强度依次为中部>南部>北部。

4 讨论

4.1 影响潜在蒸发量的常规气象要素

由于潜在蒸发量受多个气象因子影响,各个气象因子之间又存在相互影响^[10, 14, 17-19],因此其影响机理复杂,气象要素对潜在蒸发量的影响也一直是气候学和水文学研究的难点。为了探讨横断山区潜在蒸发量变化的原因,选取了7个常规气象因子,采用相关分析法来研究潜在蒸发量与常规气象因子之间的相关性(表4)。从潜在蒸发量与气候因子的相关性来看,风速、日照时数与潜在蒸发量正相关,相对湿度、降水与潜在蒸发量负相关。不同季节,不同气候因子对潜在蒸发量的影响程度不同,对春季潜在蒸发量影响较大的因素是风速和日照时数,夏季是风速、日照时数、降水量。秋季是风速和气温。冬季是风速和日照时数。全年来看,风速、日照时数、降水影响较大。春季,风速和日照时数通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验,风速和日照时数倾向率分别为 -0.015 mm a^{-1} 和 -0.290 mm a^{-1} (图6),风速和日照时数的减少导致潜在蒸发量减小。夏季,降水、风速和日照时数通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验,50年来横断山区降水略有增加,风速和日照时数略有下降(图6),可见也是风速和日照时数的下降导致了夏季潜在蒸发量减小。秋季,气温通过了 $\alpha = 0.05$ 显著性检验,风速通过了 $\alpha = 0.01$ 显著性检验,秋季气温和风速的倾向率分别为 0.015 mm a^{-1} 和 -0.013 mm a^{-1} (图6),可见秋季增温是明显的,秋季气温的增加一定程度上导致了秋季潜在蒸发量的增加。冬季风速和日照时数都通过了 $\alpha = 0.01$ 显著性检验,风速、日照时数的倾向率分别为 -0.009 mm a^{-1} 、 -0.140 mm a^{-1} (图6),风速和日照时数呈减小趋势,那么冬季潜在蒸发量的增加一定另有原因存在,50年来横断山区冬季相对湿度和降水量变化不大,但是升温明显,倾向率达到 0.017 mm a^{-1} ,所以气温升高是冬季潜在蒸发量增加的主要原因。总体来看,过去50年气温、相对湿度、降水量总体上呈增加趋势,风速和日照时数呈下降趋势,风速、日照时数、气温是年潜在蒸发量变化的主要影响因素。风速和日照时数的降低是影响横断山区潜在蒸发量减少的主导因素,风速和日照时数的下降导致春季和夏季潜在蒸发量减少,气温上升导致秋季和冬季潜在蒸发量增加。

表4 横断山区潜在蒸发量与常规气象要素相关性分析

	平均温度	平均日最高气温	平均日最低低温	相对湿度	降水量	平均风速	日照时数
春季潜在蒸发量	-0.017	-0.014	-0.023	-0.049	-0.114	0.592(**)	0.531(**)
夏季潜在蒸发量	0.172	0.251	-0.028	-0.250	-0.536(**)	0.766(**)	0.626(**)
秋季潜在蒸发量	-0.350(*)	-0.337(*)	-0.321(*)	0.010	-0.068	0.705(**)	0.165
冬季潜在蒸发量	-0.159	-0.177	-0.159	-0.058	-0.114	0.681(**)	0.411(**)
全年潜在蒸发量	-0.175	-0.137	-0.246	-0.093	-0.479(**)	0.722(**)	0.751(**)

** 通过 0.01 显著性检验; * 通过 0.05 显著性检验。

4.2 横断山区潜在蒸发量变化的特殊性

20世纪60年代横断山区潜在蒸发量先增加后减少,20世纪70年代以来呈减少趋势,进入21世纪后表现为波动增加;春季和夏季潜在蒸发量呈减少趋势,秋季和冬季呈增加趋势,雨季呈减少趋势,干季呈增加趋势。潜在蒸发量的时空分布和倾向率表现出从北至南的整体变化和空间不连续特征(图3),这一方面印证了气候变化背景下潜在蒸发量的纬度差异,一方面也反映了区域地形的影响。理论上说,横断山区典型的纵向岭谷地形在很大程度上

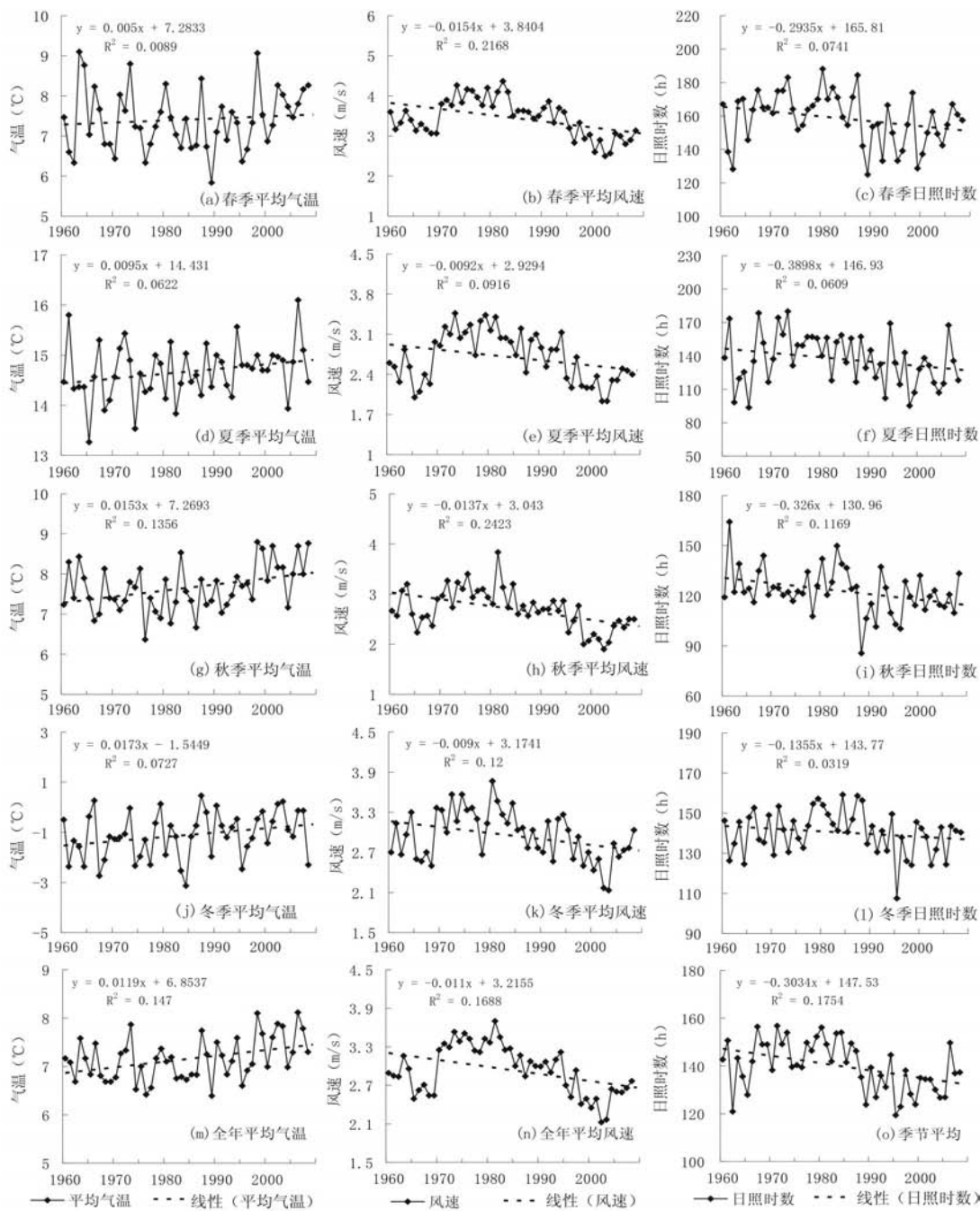


图6 1960-2009年横断山区气象因子变化

Fig. 6 Changes of meteorological elements in Hengduan Mountains during 1960-2009

会影响到该地区的气温、降水、风速等气象因子的分布态势^[20-23],进而影响该地区潜在蒸发量的空间分布。整体来看(图3),秋季和冬季潜在蒸发量倾向率等值区沿纬向延伸,纵向山脉的影响并不明显,反映了温度主导下的潜在蒸发量分布和变化模式,夏季潜在蒸发量倾向率等值区沿经向山脉向南北延伸,独特的纵向岭谷地形形成了区域南北水热分布的连续性强于东西的现象,进而决定了潜在蒸发量的空间分布,这种现象在横断山东南部锦屏山一带,横断山中部和北部宁静山、沙鲁里山、大雪山、夹金山一带较为突出。

5 结论

(1) 横断山区多年平均年潜在蒸发量在245.3~909.0 mm之间,南部潜在蒸发量大于中部和北部,低海拔地区大于高海拔地区;春季、夏季、秋季和冬季分别占年潜在蒸发量的24%、31%、29%和16%;夏季潜在蒸发量倾向率等值区明显沿纵向岭谷向南北延伸。

(2) 近50年来横断山区年均潜在蒸发量呈现明显减少趋势,20世纪60年代增加,70年代至80年代基本稳定,90年代急剧减少,2000-2009年波动增加;南部潜在蒸发量减少最为明显,春季和秋季潜在蒸发量变化幅度最大;干季和雨季潜在蒸发量都表现出减小的态势,雨季减小幅度大于干季,干季越向南部潜在蒸发量减小的趋势越明显;雨季中部潜在蒸发量减小幅度最大。

(3) 气温、风速和日照时数是影响横断山区潜在蒸发量变化的主导因素,风速和日照时数的减小导致春夏季潜在蒸发量减少,气温上升导致秋冬季潜在蒸发量增加。

参考文献 (References)

- [1] Brutsanrtw Parlengem B. Hydrological cycle explain the evaporation paradox. *Nature*, 1998, 396: 30-31.
- [2] Roder Ickml, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 2002, 298: 1410-1411.
- [3] Ohmura A, Wldm. Is the hydrological cycle accelerating? *Science*, 2002, 298: 1345-1346.
- [4] Chattopadhyay N, Hulmem. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 87: 55-72.
- [5] Qin Nianxiu, Chen Xi, Xue Xianwu et al. An applicability study of potential evapotranspiration models in Guizhou province. *Advances in Water Science*, 2010, 21(3): 357-363. [秦年秀, 陈喜, 薛显武等. 潜在蒸散发量计算公式在贵州省适用性分析. *水科学进展*, 2010, 21(3): 357-363.]
- [6] Yang Yonghong, Zhang Zhanyu. Method for calculating Lasa reference crop evapotranspiration by modifying Hargreaves. *Advances in Water Science*, 2009, 20(5): 614-618. [杨永红, 张展羽. 改进Hargreaves方法计算拉萨参考作物蒸发蒸腾量. *水科学进展*, 2009, 20(5): 614-618.]
- [7] Ye Xinfu. Optimum comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration. *Journal of Agricultural Engineering*, 2005, 51(1): 27-37. [叶信富. 潜势能蒸散发经验公式之最佳化比较. *农业工程学报*, 2005, 51(1): 27-37.]
- [8] Liu Xiaoying. Impact of climate change on water requirement of main crops in North China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(2): 77-87. [刘晓英. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响. *水利学报*, 2004, 35(2): 77-87.]
- [9] Yang Guiyu, Wang Zhisheng, Wang Hao et al. Potential evapotranspiration evolution rule and its sensitivity an analysis in Haihe River basin. *Advances in Water Science*, 2009, 20(3): 409-415. [杨贵羽, 王知生, 王浩等. 海河流域 ET_0 演变规律及灵敏度分析. *水科学进展*, 2009, 20(3): 409-415.]
- [10] Jia Wenxiong, He Yuanqing, Wang Xufeng et al. Temporal and spatial change of the potential evaporation over Qilian Mountains and Hexi Corridor from 1960 to 2006. *Advance in Water Science*, 2009, 20(2): 159-167. [贾文雄, 何元庆, 王旭峰等. 祁连山及河西走廊潜在蒸发量的时空变化. *水科学进展*, 2009, 20(2): 159-167.]
- [11] Huang Zhongyan. Research on relationships between monthly evaporation and conventional meteorological elements during dry season in Yunnan. *Progress in Geography*, 2010, 29(2): 138-144. [黄中艳. 云南干季月蒸发量与常规气象要素的关系. *地理科学进展*, 2010, 29(2): 138-144.]
- [12] Zhu Guofeng, He Yuanqing, Pu Tao et al. character and sources of conventional anion in different water bodies on the summer in Yulong Snow Mountain area. *environmental science*, 2011, 32(3): 626-631. [朱国锋, 何元庆, 蒲涛等. 夏季玉龙雪山地区不同水体常规阴离子特征及来源分析. *环境科学*, 2011, 32(3): 626-631.]
- [13] Wang Zunya. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(2): 228-236. [王遵娅. 近50年来中国气候变化特征的再分析. *气象学报*, 2004, 62(2): 228-236.]
- [14] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength. *Nature*, 1995, 377: 687-688.
- [15] Burn D H, Hesch N M. Trends in evaporation for the Canadian prairies. *Journal of Hydrology*, 2007, 336: 61-73.
- [16] Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 87: 55-72.
- [17] Cohen S, Ianetz A, Stanhill G. Evaporative climate changes at Bet Dagan, Israel, 1964-1998. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111: 83-91.

- [18] Brutsaert W, Parlange M B. Hydrological cycle explain the evaporation paradox. *Nature*, 1998, 396: 30-31.
- [19] Roderick M L. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 2002, 298: 1410-1411.
- [20] Cao Jie, He Daming, Yao Ping. Research on the spatial distribution of rainfall and temperature in winter and summer over Longitudinal Range Gorge Region (LRGR). *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(11): 1176-1182. [曹杰, 何大明, 姚平. 纵向岭谷区冬、夏水热条件空间分布研究. *地球科学进展*, 2005, 20(11): 1176-1182.]
- [21] Wan Yunxia, Zhang Wancheng, Xiao Ziniu. Spatiotemporal variation characteristics of air temperature in longitudinal ridge gorge region of Yunnan in recent century. *Journal of Natural Disaster*, 2009, 18(5): 193-188. [万云霞, 张万诚, 肖子牛. 近百年云南纵向岭谷区气温的时空变化特征. *自然灾害学报*, 2009, 18(5): 183-188.]
- [22] Li Shaojuan, He Daming, Zhang Yiping. Spatio-temporal variation and the law in regional differences of precipitation in Longitudinal Range-Gorge Region (LRGR). *Chinese Sciences Bulletin*, 2007, 52(suppl. II): 51-63. [李少娟, 何大明, 张一平. 纵向岭谷区降水量时空变化及其地域分异规律. *科学通报*, 2007, 52(增刊2): 51-63.]
- [23] You Weihong, He Daming, Duan Changchun. Climate change of the longitudinal range-gorge in Yunnan and its influence on the river flow. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 95-105. [尤卫红, 何大明, 段长春. 云南纵向岭谷地区气候变化对河流径流量的影响. *地理学报*, 2005, 60(1): 95-105.]
- [24] Zhang Mingjun, Li Ruixue, Jia Wenxiong et al. Temporal and spatial changes of potential evaporation in Tianshan Mountains from 1960 to 2006. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(7): 798-806. [张明军, 李瑞雪, 贾文雄 等. 中国天山山区潜在蒸发量的时空变化. *地理学报*, 2009, 64(7): 798-806.]
- [25] Wu Shaohong, Yin Yunhe, Zheng Du et al. Study on dry-wet conditions of land surface in China in recent 30 years. *Science in China: Series D*, 2005, 35(3): 276-283. [吴绍洪, 尹云鹤, 郑度 等. 近30年中国陆地表层干湿状况研究. *中国科学: D辑*, 2005, 35(3): 276-283.]
- [26] Hutchinson M F, Gessler P E. Splines is more than just a smooth interpolator. *Geoderma*, 1994, 62: 45-67.
- [27] Thornton P E, Running S W, White M A. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *Journal of Hydrology*, 1997, 190: 214-251.

Spatial Distribution and Temporal Trends in Potential Evaporation over Hengduan Mountains Region from 1960 to 2009

ZHU Guofeng¹, HE Yuanqing^{1,2}, PU Tao², LI Zongxing¹,
WANG Xufeng¹, JIA Wenxiong³, XIN Huijuan¹

(1. State Key Laboratory of Cryosphere Sciences Yulong Snow Mountain Glaciers and Environmental Observation Station,
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China;

2. Research School of Arid Environment and Climate Change, Lanzhou university, Lanzhou 730000, China;

3. College of Geography and Environment Science of Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In this paper, annual and seasonal changes of potential evaporation were analyzed to conduct studies on hydrological model and ecological environment based on climate data at 20 meteorological stations in the Hengduan Mountains region during 1960-2009, in combination of the Penman-Monteith model. The changing trend in potential evaporation over the Hengduan Mountains is analyzed in this study. With the method of Spline under ArcGIS, the spatial distribution of potential evaporation is presented to research the regional difference. And the correlation analysis is used to discuss the dominant factor affecting the potential evaporation. The results indicate that the annual potential evaporation showed a decreasing tendency since the 1960s, especially from the 1980s to the 1990s, while it showed an increasing tendency since 2000. Regional potential evaporation showed a rate of -0.17 mm a^{-1} . The potential evaporation in north, middle and south of Hengduan Mountains exhibited decreasing trends over the studied period, and its regional trend was on the decline from the southwest to the northeast.

Key words: Hengduan Mountains; potential evaporation; Spline interpolation; Penman-Monteith model; spatial and temporal variation