

文章编号: 2096-1618(2016)02-0204-09

# 基于 GLDAS 资料的青藏高原下垫面变化特征分析

陈宇航, 范广洲, 张永莉, 华 维, 赖 欣, 朱丽华, 王炳赞  
(成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225)

**摘要:**为了研究青藏高原下垫面气候变化特征,利用全球陆面数据同化系统逐月资料,采用线性回归和滑动 T 检验等方法,对青藏高原下垫面物理量的年际变化、年际变化空间分布进行初步分析,同时分季节讨论各物理量的年际变化特征。结果表明:1948~2010 年高原下垫面逐渐趋于暖湿化,能量与水分循环发生着显著的变化,高原下垫面能量变化快于水分循环变化。各要素年际变化在各个季节表现出不同的特征。高原气候变化总体表现为:地表净短波辐射减弱,净长波辐射增强。随着净短波辐射的减弱,感热通量表现出相同的变化趋势。随着总蒸散的增强,潜热通量增加。下垫面温度升高,降水增多。植被冠层含水量、地表径流增加。地温升高,使得下垫面土壤湿度加大。地表气压增加,风速减弱,比湿降低。各要素年际变化存在明显的区域特征。

**关 键 词:**大气科学;气候变化;青藏高原;下垫面; GLDAS

**中图分类号:**P463.1

**文献标志码:**A

## 0 引言

1979 年世界气象大会启动世界气候计划,气候变化成为全球环境热点问题研究方向<sup>[1-2]</sup>。素有世界第三极之称的青藏高原(下称“高原”),由于地势复杂,受人类活动影响少,作为全球变化的敏感区与放大器<sup>[3-5]</sup>,其气候变化更具有代表性和说明性。近十年来已有很多学者对此进行探讨和研究等<sup>[6-34]</sup>。林振耀等<sup>[6]</sup>指出在 20 世纪 50 年代到 80 年代末,青藏高原气温整体升高,以冬季升温最为显著,降水变化具有区域性,平均降水呈减少趋势;吴绍洪等<sup>[7]</sup>指出在 1971~2000 年,高原全区 74 个站点平均温度升高,但平均降水主要以增加趋势为主,69% 的站点表现出降水增加,Penman-Monteith 模型模拟的结果显示,最大可能蒸散减少,干燥度降低。对于高原气候转暖,已经得到越来越多的学者认同<sup>[8-13]</sup>。牛涛等<sup>[8]</sup>指出高原气候在 20 世纪 80 年代中后期存在明显的由暖干向暖湿时期的转变特征,增温和增湿现象在冬季最为明显,且气温和降水的转变早于相对湿度的转变,李林等<sup>[9]</sup>得出了高原气候趋于暖湿化的研究结论,并指出高原夜间升温要比日间显著,与 Yuichiro Oku 等<sup>[10]</sup>利用 GMS 卫星数据的研究结果相一致,这主要与夜间低云数量增加,大气逆辐射增强有关<sup>[11]</sup>,且日间总云量减少导致的升温幅度小于夜间升温幅度,高原日较差正在减小<sup>[10-11]</sup>,IPCC 模拟研究温室气体中等排放水平下,21 世纪末高原升温幅度加大,未来 100 年,升温幅度达到

0.45 °C/10 a,降水增加幅度为 10.08 mm/10 a<sup>[12]</sup>。Yang 等<sup>[13]</sup>指出,高原地表温度升温率对高度具有明显的依赖性,在海拔 3~4.8 km 表现为升温,5~6.2 km 温度相对稳定,在更高的高度上,温度略降低;在空间上,高原整体表现为升温,高原东南部和东喜马拉雅山为主要的升温区,但在同样为冰川覆盖区的西昆仑山等 80 °E 以西地区,温度降低。在北半球地表风速减弱的情况下<sup>[14]</sup>,高原风速也被发现趋于减小<sup>[13,15]</sup>,Lin 等<sup>[16]</sup>发现高空风速具有相同变化,高原地表风速变化要强于低海拔地区,Yang 等<sup>[13]</sup>讨论指出风速减弱是由高空向下垫面传递的,且风速的这种减弱现象与 500 hPa 位势高度梯度受温度变化的区域性影响有关。

近年来,人们开始越来越多的关注高原能量和水分平衡对气候变化的响应<sup>[13,17]</sup>。Yang 等<sup>[13]</sup>指出高原日照时间从 20 世纪 60 年代持续增加,在 20 世纪 70 年代初日照时间逐渐减少,且主要集中在夏季,You 等<sup>[18-19]</sup>得出了高原日照时间在 1982 年之后减少的结论,这与高原气温升高很矛盾,气溶胶很可能是这一现象的产生原因,Yang 等<sup>[20]</sup>通过分析气溶胶沉淀和水汽与低云量对短波辐射的影响,指出在年际和年代际时间尺度上,后者才是该现象产生的原因。Li 等<sup>[21]</sup>利用 CMIP5 数据计算指出 20 世纪末高原地表潜热通量增加,感热通量减少,与 Yang 等<sup>[13]</sup>利用站点资料计算得出感热以每 10 年减少 1.2 W/m<sup>2</sup> 的趋势一致。高原作为世界和中国的水塔<sup>[22]</sup>,对于高原下垫面水分平衡的研究十分重要。You 等<sup>[23]</sup>指出雅鲁藏布水域降水在 20 世纪 80 年代前表现为减少趋势,在此之后降水逐渐增加,温度显著升高,年平均和季节平均潜在蒸发

收稿日期:2015-04-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41275079、41405069);国家青年科学基金资助项目(41305077)

均减弱。模式模拟研究指出高原近30年蒸发在增加<sup>[24]</sup>,卫星观测数据显示春季土壤解冻时间提前14天,秋季土壤冻结时间滞后10天<sup>[25]</sup>,最大季节冻土深度已减少至33 cm<sup>[26]</sup>。沿青藏公路监测的永久冻土温度也出现了升温趋势<sup>[27]</sup>,高原作为世界水塔,Xu等<sup>[22]</sup>指出大气向高原下垫面输送的水分增加,这是否意味着高原下垫面水分循环正在加快?

全球气候正在趋于极端化<sup>[28]</sup>,高原气候变化与中国降水和季风变化紧密联系<sup>[29]</sup>,探讨高原气候变化特征对中国气候预测具有重要的指导意义。由于高原台站资料相对稀疏且分布不均匀,主要分布在高原东南部,各物理要素的卫星观测资料时间尺度有限,观测时间不统一,使用GLDAS数据可以很好地在时间和空间上分析高原下垫面气候变化特征,同时GLDAS数据包含下垫面多种物理量(地表径流、总蒸散等),可以弥补台站和卫星观测的不足,使对高原下垫面气候变化有更进一步的了解和分析研究。主要探讨基于GLDAS数据高原下垫面物理量气候变化特征,同时结合已有研究结论分析GLDAS数据所表现出来的高原气候变化特征客观性,以期认识高原气候变化增加多方面了解。

## 1 资料简介与研究方法

### 1.1 资料简介

GLDAS (global land data assimilation system) 是由美国航空航天局和美国海洋和大气局联合开发的全球陆面数据同化系统,其产品分为GLDAS-1和GLDAS-2,时间分辨率分为月和3小时,空间分辨率分为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 和 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。前者选取观测数据和卫星数据作为驱动场,分别驱动4个陆面模式(Mosaic、Noah、CLM、VIC),得到一套从1979年至今的全球范围的陆面数据,包括土壤湿度、地表蒸发等数据,后者采用普林休斯敦大学全球气象数据作为强迫场,且该数据集已经进行了统一的偏差校正,数据在连续性上明显优于前者,使用Noah陆面模式,模拟出一套从1948年到2010年的长时间序列的陆面资料,为高原等一些观测资料缺乏地区提供了可利用的科研数据。

王婉昭等<sup>[30]</sup>分析了GLDAS的适用性。将GLDAS与中国地面气温格点数据集在各区域进行相关系数和均方根误差分析,GLDAS在1979~1994年适用性高于2000~2007年,干旱区好于半湿润区;降水数据也是如此,在半干旱区和半湿润区的适用性好于其他地区。Wang等<sup>[31]</sup>对比多种在分析资料在高原上的适

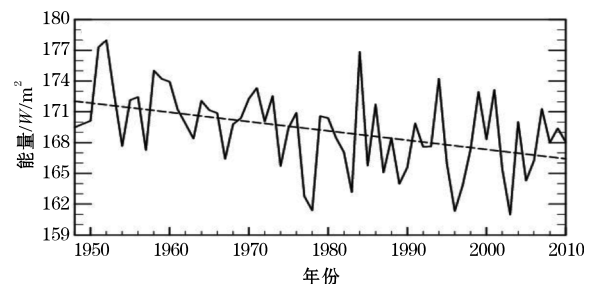
用性,指出GLDAS降水和温度数据在高原均具有可用性。王文等<sup>[32]</sup>指出GLDAS-2降水数据具有很好的趋势表述能力。

### 1.2 研究方法

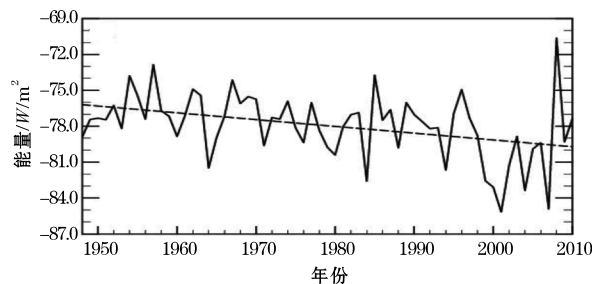
主要选取 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的月平均GLDAS-2数据,分析高原( $30^{\circ}\text{N}$ - $36^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{E}$ - $100^{\circ}\text{E}$ )范围内,2 m气温、降水、植物冠层地表水、2 m比湿、地表径流、蒸散、10 m风速、地表气压、地表净短波和长波辐射、感热和潜热通量、土壤温度和湿度等下垫面物理量,通过计算各物理量区域平均的年平均值来分析其年际变化特征,计算季节平均分析各物理量的季节变化特征以及使用滑动T检验(时间步长10年)方法对各物理量的突变时间点进行分析,以及分析各要素年平均的变化趋势系数分布特征。

## 2 高原下垫面各物理量的年际变化特征分析

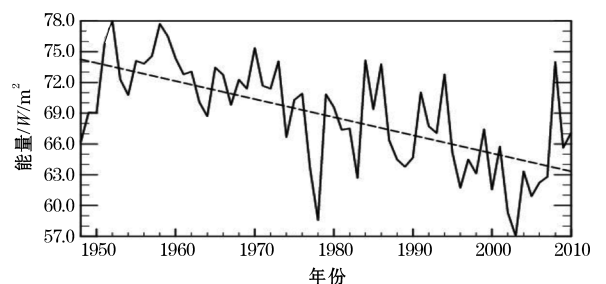
### 2.1 高原下垫面能量的年际变化特征



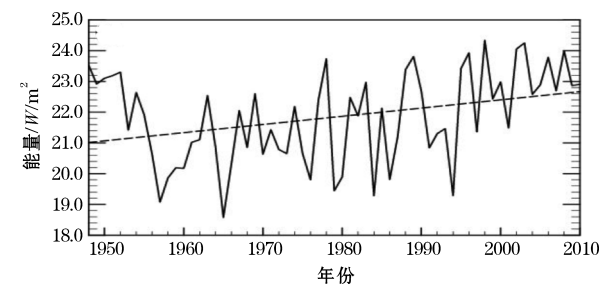
(a) 净短波辐射



(b) 净长波辐射



(c) 感热通量



(d) 潜热通量(虚线为线性回归线)

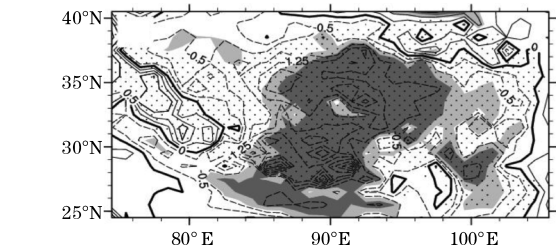
图 1 地表能量的年际变化

从 20 世纪 50 年代起,高原地表净短波辐射减少(图 1),与 You 等<sup>[18-19]</sup>、Li 等<sup>[21]</sup>和 Yang 等<sup>[13]</sup>研究结果相一致。GLDAS 数据显示,高原净短波辐射四季均减少,主要以春夏季明显(表 1),高原地表净短波辐射正经历着和全球大气相一致的变化<sup>[33]</sup>,这主要与高原日照持续时间减少<sup>[13]</sup>以及高原总云量<sup>[11]</sup>的减少有关。在 1973 年通过显著性检验,发生突变,这一突变时间与高原日照时数和太阳辐射的转变时间点一致,高原日照时数和太阳辐射在 20 世纪 70 年代后期发生转变<sup>[13]</sup>。GLDAS 地表净长波辐射自 1948 年到 2010 年亦呈现减少趋势,即高原下垫面传递给大气的长波

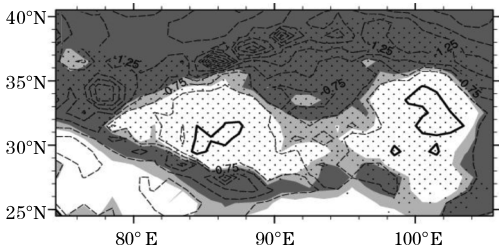
辐射增多,气候倾向率小于净短波辐射,在冬秋季节气候变化明显,春季次之,夏季净长波辐射数值略有减少,在 1997 年发生突变,突变后长波辐射显著加强,这主要与高原气温升高有关<sup>[7-9]</sup>;高原地表潜热与总蒸散趋势相一致,四季潜热增多,以春季增加最为明显,夏秋季次之,在 1994 年潜热开始显著增加。感热与短波辐射变化趋势一致,这与 Li 等<sup>[21]</sup>和 Yang 等<sup>[13]</sup>研究结果相一致, Yang 等<sup>[13]</sup>利用站点资料计算得出自 1984 年到 2006 年高原年平均感热通量变化为  $-1.2\text{ W/m}^2/10\text{ a}$ , Li 等<sup>[21]</sup>利用 CMIP5 数据计算高原感热与潜热通量的年际变化指出,在 20 世纪 80 年代后,高原感热与潜热较前期表现出明显差异,前者减少,后者增多。GLDAS 数据感热四季均表现为明显地减少趋势,在春季减少最明显,年平均减少幅度大于短波辐射变化和潜热增加幅度,在 1973 年感热开始显著减少。从表 1 中同样可以看出,各能量分量的气候倾向率均大于其他物理量,这表明高原下垫面能量变化快于水分循环变化。而对于高原大气的能量与水分循环是否展现出同样变化,需要更进一步的分析和研究。

表 1 各物理量气候倾向率(/10 年)

变量	突变时间	年	春	夏	秋	冬
地表温度/℃	1997(99.8 %)	0.047	0.002	-0.00078	0.015	0.143
植物冠层含水量/mm	-	0.001	0.001	0.002	0.0006	0.00015
总蒸散/mm/day	1994(99 %)	0.009	0.017	0.009	0.006	0.002
地表净长波辐射/W/m <sup>2</sup>	1997(99.95 %)	-0.568	-0.576	0.081	-0.988	-1.019
地表气压/hPa	1976(99.99 %)	0.397	0.231	0.391	0.427	0.359
2 m 地表比湿/g/kg	1997(99.98 %)	-0.034	-0.097	-0.019	-0.034	-0.003
地表感热通量/W/m <sup>2</sup>	1973(99.9 %)	-1.761	-2.365	-1.35	-1.854	-1.686
地表潜热通量/W/m <sup>2</sup>	1994(99 %)	0.267	0.519	0.257	0.191	0.07
地表径流/mm/day	1961(99.8 %)	0.004	0.008	0.008	0.00063	0.00057
降水/mm/day	1966(97.5 %)	0.018	0.014	0.047	0.011	0.00032
0~10 cm 土壤湿度/mm	1995(99.95 %)	0.08	0.111	0.102	0.073	0.028
地表净短波辐射/W/m <sup>2</sup>	1973(99.5 %)	-0.907	-1.251	-1.181	-0.651	-0.562
空气温度/℃	1977(99.99 %)	0.125	0.098	0.064	0.086	0.2290
0~10 cm 土壤温度/℃	1977(99.9 %)	0.045	0.014	-0.002	0.011	0.127
10 m 风速/m/s	1975(99.99 %)	-0.049	-0.088	-0.004	-0.089	-0.033

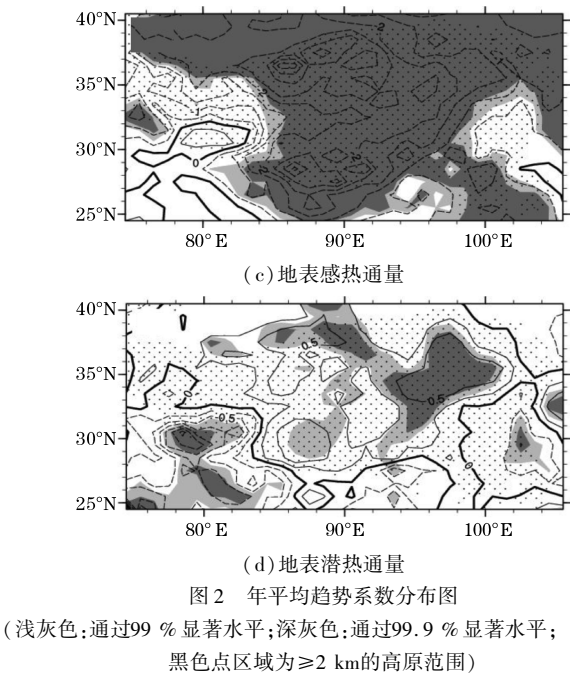


(a) 地表净短波辐射



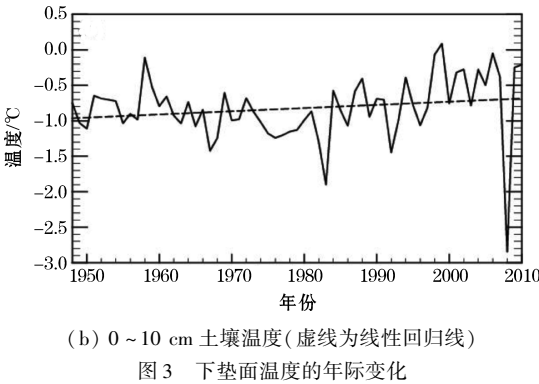
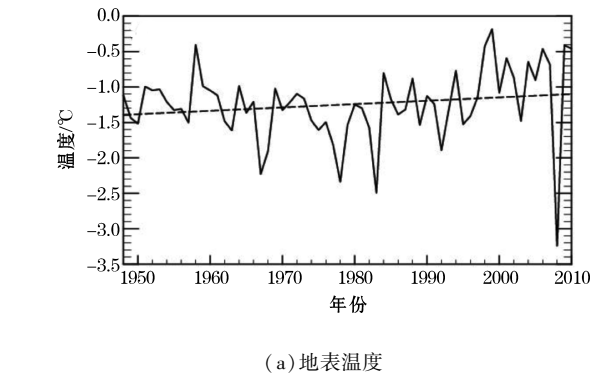
(b) 地表净长波辐射





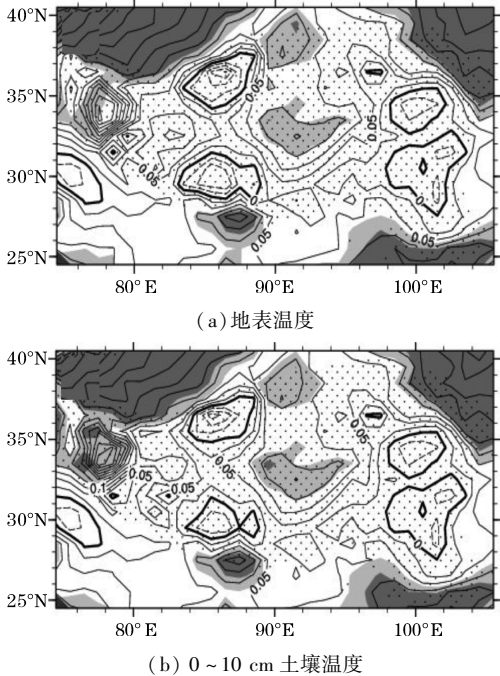
从高原范围内各物理量的趋势系数分布图(图2)可以看出,高原全区净短波辐射呈现减少状态,在中部、南部和东南部等部分地区通过99.9 %的显著性检验,且南部的变化幅度大于其他区域。在高原西部 $30^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ ,净短波辐射以增加为主要变化特征。净长波辐射在2 km以上的高原区域均表现为减少趋势,即高原全区下垫面传递给大气的长波辐射增多,高原边缘的变化趋势大于高原主体区域,且高原边缘地区均通过显著性检验,在北部地区( $90^{\circ}\text{E}, 35^{\circ}\text{N}$ )所在区域也通过了显著性检验,在高原东部和西部没有通过显著性检验。高原全区感热的趋势系数的分布特征与净短波辐射相近,高原感热通量全区减少,与前者相比,变化幅度大,高原中部变化特征最为显著,在南部和偏西北部变化最大。高原潜热变化特征主要变现为增加,沿塔里木盆地以及下游地区为变化最为显著地区,在高原西南部以及部分南部和东南部地区潜热增多,且在西南部通过显著性检验。地表的热量变化特征分析中,以下垫面感热通量变化幅度最大且通过显著性检验的区域也很大。

2.2 高原下垫面温度的年际变化特征



自 1948 ~ 2010 年,高原大气年平均温度升高(图略),并在 1977 年发生显著突变(表 1),突变后大气温度迅速升高,四季均表现升温趋势,升温以冬春季为主。地表温度图 3(a)升温幅度小于前者,升温主要发生在冬季和秋季,在 1997 年发生突变,相对晚于前者。土壤温度在 1977 年开始显著升温,以冬季升温最明显,夏季表现弱的降温趋势。下垫面温度的升温幅度小于气温升温幅度。土壤温度的突变时间与空气温度的突变时间相一致,地表温度的突变时间相对落后。而对于 GLDAS 数据显示不同层次的温度变化的相同与不同之处,由于 GLDAS 数据模拟数据,存在一定的局限性,还需要其他数据的验证。

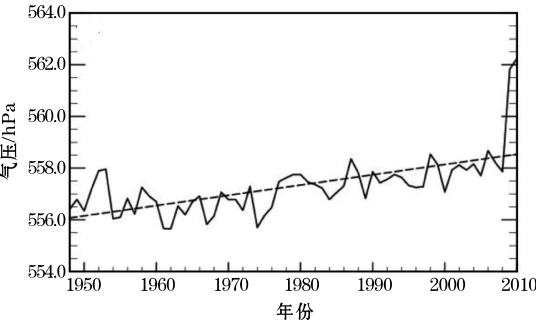
在空间分布(图 4)上,高原地表温度主要变现为升高趋势,仅在北部的部分地区通过99 %的显著性检验,在昆仑山东部、喜马拉雅山脉的北侧局地 and 东南部分地区温度表现为降温,并未通过显著性检验。土壤湿度年际变化的空间分布特征与前者相似。相比于热量的变化趋势,总的变温趋势不是十分明显。



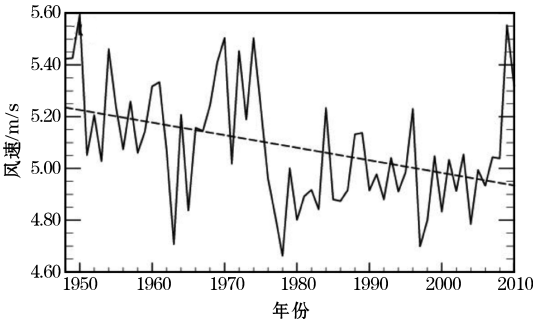


2.3 高原地表气压和 10 m 风速的年际变化特征

地表气压在 20 世纪 70 年代中期以前变化不明显(图 5),1976 年之后显著升高。总体来看,地表气压升高,这与 Moore 等<sup>[34]</sup>研究结果一致,Moore 指出高原地表气压自 1870s 显著增加,在 1980s 增加幅度加大。但 GLDAS 地表气压在 1976 年发生突变(表 1),地表气压各季节均明显升高,这主要与区域性增暖有关<sup>[13]</sup>。高原近地层风速呈现减小趋势,主要与高原范围内气压梯度减弱有关<sup>[15]</sup>。1975 年前,风速呈减少趋势,突变后,风速表现为弱的上升趋势。对应在 You 等<sup>[15]</sup>的研究中,从 1980 年到 2005 年高原东部 2000 m 海拔高度以上的台站风速以  $-0.24\text{ m/s}/10\text{ a}$  变化,80 年代后,高原中东部风速减弱,而在 Li 等<sup>[21]</sup>的研究中,高原水平风速年际变化不明显。四季均表现风速减弱,风速减弱现象主要以春秋季节最为明显。

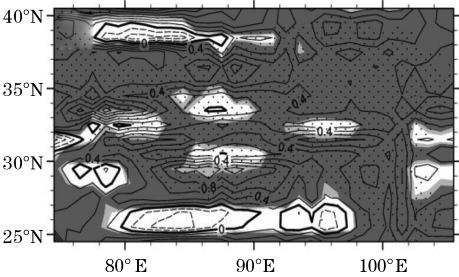


(a) 地表气压的年际变化

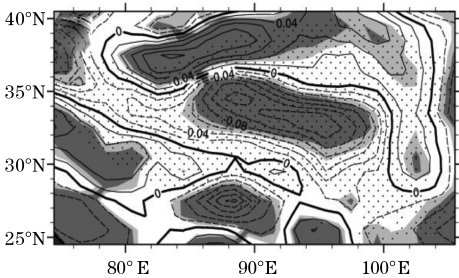


(b) 10 cm 风速的年际变化

图 5 地表气压、10 cm 风速的年际变化



(a) 地表气压



(b) 10 cm 风速

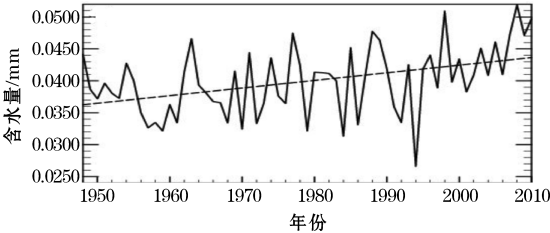
图 6 年平均趋势系数分布图

(浅灰色:通过 99 % 显著水平;深灰色:通过 99.9 % 显著水平;黑色点区域为  $\geq 2\text{ km}$  的高原范围)

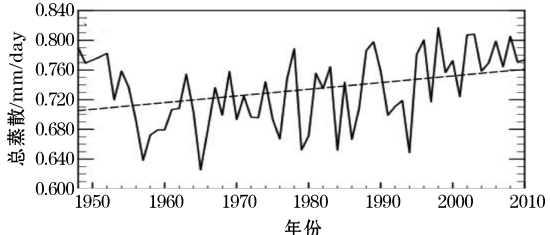
从地表气压的趋势系数分布图(图 6)可以看出,高原全区地表气压升高,且大部分地区通过 99.9 % 显著性检验,仅在部分地区气压降低,并未通过显著性检验。高原风速在高原北侧、西南侧和东部地区增大,中部和南部风速减弱,且中心区域通过显著性检验。

2.4 高原下垫面水平平衡的年际变化特征

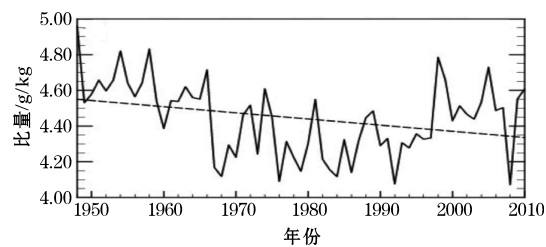
高原降水增多(图 7),四季降水以夏季降水增多最为明显(表 1)。对应高原总蒸散增多,两者趋势一致,后者在 1994 年通过了 99% 的显著性突变检验,主要以春季增多最为明显。研究表明,高原地表温度和降水<sup>[8]</sup>在 20 世纪 80 年代中期发生了突变,但 GLDAS 降水、地表径流、植被冠层含水量突变时间不显著,地表径流和植被冠层含水量增多,以春夏季变化最为明显。由于土壤温度升高,土壤湿度以  $0.08\text{ mm}/10\text{ a}$  的幅度加大,土壤湿度在 1995 年显著加大,以春季和夏季最为明显,对应 Li 等<sup>[25]</sup>、Li 等<sup>[26]</sup>、Wu 等<sup>[27]</sup>研究,可以得出如下结论:高原大气趋于暖湿状态,同时下垫面水分循环加快,高原下垫面也是趋于暖湿状态的。低层大气湿度降低,以春季降低幅度最大,在 1997 年通过显著性检验。



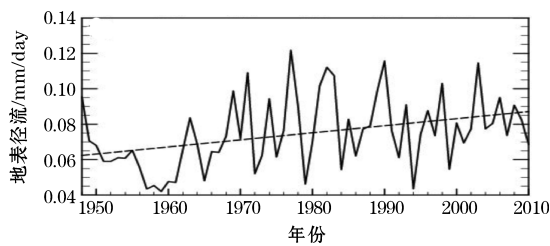
(a) 植被冠层含水量



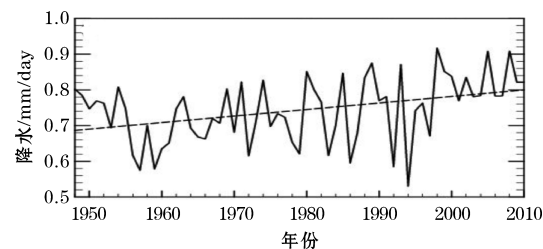
(b) 总蒸散



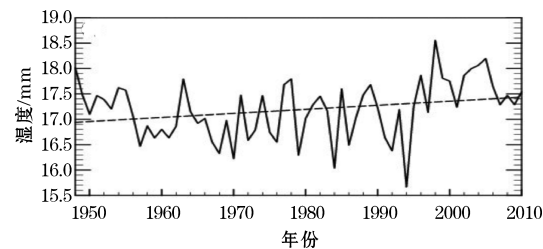
(c) 2 m 地表比湿



(d) 地表径流

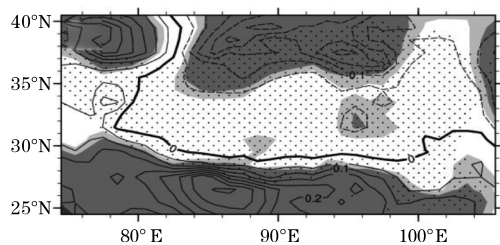


(e) 降水

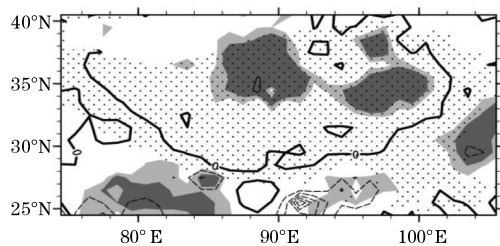


(f) 0 ~ 10 cm 土壤湿度

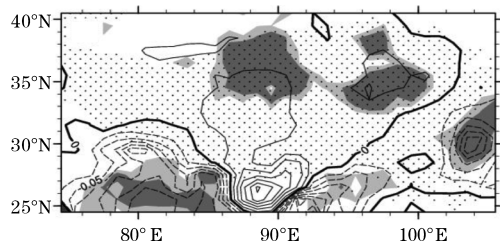
图 7 下垫面水平平衡的年际变化(虚线:线性回归线)



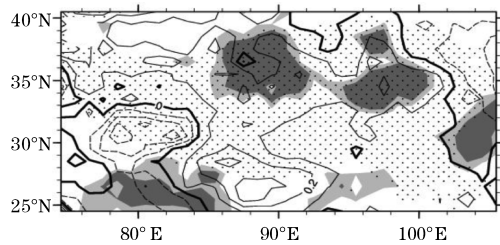
(c) 2 m 地表比湿



(d) 地表径流



(e) 降水

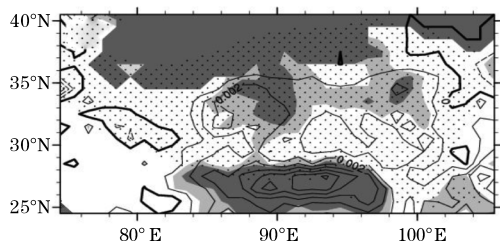


(f) 0 ~ 10 cm 土壤湿度

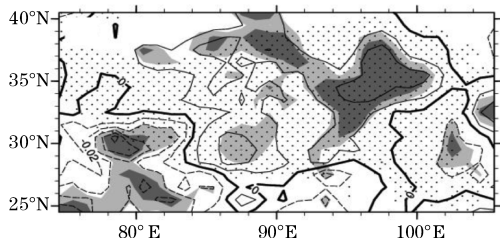
图 8 年平均趋势系数分布图

(浅灰色:通过 99 % 显著水平;深灰色:通过 99.9 % 显著水平;黑色点区域为  $\geq 2$  km 的高原范围)

在趋势系数分布图(图 8)上,高原降水总体增加,在昆仑山东部和巴颜喀拉山通过 99.9 % 的显著性检验,高原南侧降水显著减少。高原主体和南侧区域,植被冠层含水量增多,以南侧区域最为显著。高原总蒸散变化特征主要表现为增加,与高原潜热趋势变化特征相同。高原地表 2 m 比湿在高原主体范围内表现为弱的干化特征,高原北部比湿降低较大且显著,在高原南侧比湿显著增加。地表径流的趋势分布与降水变化特征相似。随着降水的增多,土壤温度的升高,高原土壤湿度加大,高原南部和巴颜喀拉山表现最为明显,在西南部存在一个土壤湿度降低的区域,以昆仑山东部和巴颜喀拉山最为显著。



(a) 植被冠层含水量



(b) 总蒸散

### 3 结论

使用1948~2010年GLDAS数据,初步分析了高原气候变化特征。高原下垫面气候逐渐转为暖湿状态,气候变化特征明显,高原下垫面能量变化趋势大于水分循环。各要素气候变化在各个季节表现出不同的特征。高原下垫面变化特征主要表现为:

(1)高原地表净短波辐射减弱,净长波辐射增强,前者气候倾向率大于后者。随着净短波辐射的减弱,感热通量便显出相同的变化趋势,且变化幅度大于前者。随着总蒸散的增强,潜热通量增加。

(2)高原净短波辐射全区减少,以南部趋势最为明显,仅在中部、南部和东南部等部分地区通过检验;在高原西部局部范围内,以增加为主要变化特征。净长波辐射表现为减少趋势,高原边缘的变化趋势显著大于高原主体区域。感热减少,变化幅度大于前两者,以高原中部最为显著。高原潜热变化特征主要变现为增加,以塔里木盆地以及下游地区最为显著,在高原南部部分地区潜热增多,局地西南部最为显著。

(3)下垫面温度升高,降水增多,总蒸散增强。植被冠层含水量、地表径流增加。地温升高,使得下垫面土壤湿度加大。地表气压增加,风速减弱,比湿降低。从各要素的气候倾向率可以发现,高原下垫面能量变化快于水分循环。从上面的结论可以看出,高原下垫面各要素的年际变化之间的复杂相互联系。

(4)高原全区下垫面温度升高,部分地区表现降温,总的变温趋势不是十分明显。高原全区地表气压显著升高。高原主体风速显著减弱。高原降水总体增加,高原南侧降水显著减少。植被冠层含水量增多,以南侧区域最为显著。总蒸散、地表径流和土壤湿度与降水的趋势分布相一致。高原比湿降低,以北部变化较大且显著,南侧比湿显著增加。

从以上的分析中得出许多基于GLDAS数据的高原气候变化特征,在与前人的研究比较中,可以看出GLDAS数据对高原气候变化具有一定的描述能力,同时也要指出由于模拟数据的局限性导致GLDAS数据在研究高原气候变化中存在许多不足之处。文章中并没有对各物理量的相互联系作进一步的深入分析和探讨,这也是值得更多的学者思考和研究的问题。

致谢:感谢成都信息工程大学中青年学术带头人科研基金(J201516,J201518)对本文的资助

### 参考文献:

- [1] 陈泮勤. 世界气候研究计划(WCRP)及其进展[J]. 1995,地球科学进展,10(5):488-491.
- [2] 孙成权,张志强. 国际全球变化研究计划综览[J]. 地球科学进展,1994,9(3):53-70.
- [3] 潘保田,李吉均. 青藏高原:全球气候变化的驱动力与放大器. III. 青藏高原隆起对气候变化的影响[J]. 兰州大学学报,1996,32(1):108-115.
- [4] 姚檀栋,朱立平. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策[J]. 地球科学进展,2006,21(5):459-464.
- [5] 卢爱刚,何元庆,张忠林,等. 中国大陆对全球变暖响应的区域敏感性分析[J]. 冰川冻土,2005,27(6):827-832.
- [6] 林振耀,赵听奕. 青藏高原气温降水变化的空间分布[J]. 中国科学(D辑),1996,26(4):354-358.
- [7] 吴绍洪,尹云鹤,郑度,等. 青藏高原近30年气候变化趋势[J]. 地理学报,2005,60(1):3-11.
- [8] 牛涛,刘洪利,宋燕,等. 青藏高原气候由暖干到暖湿时期的年代际变化特征研究[J]. 应用气象学报,2005,16(6):763-771.
- [9] 李林,朱西德,王振宇,等. 青藏高原气候变化趋于暖湿化的若干事实[C]. 第26届中国气象学会年会气候变化分会场论文集,2009:936-942.
- [10] Oku Y, Ishikawa H, Su Z. Estimation of Land Surface Heat Fluxes over the Tibetan Plateau Using GMS Data[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007, 46(2):183-195.
- [11] Duan A, Wu G. Change of cloud amount and the climate warming on the Tibetan Plateau [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(22):217-234.
- [12] 程志刚,刘晓东,范广洲,等. 21世纪青藏高原气候时空变化评估[J]. 干旱区研究,2011,28(4):669-676.
- [13] Yang K, Wu H, Qin J, et al. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review [J]. Global and Planetary Change, 2014, 112(1):79-91.



- [14] Vautard R, Cattiaux J, Yiou P, et al. Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(11):756–761.
- [15] You Q, Kang S, Flugel W, et al. Decreasing wind speed and weakening latitudinal surface pressure gradients in the Tibetan Plateau [J]. *Climate Research*, 2010, 42(1):57–64.
- [16] Lin C, Yang K, Qin J, et al. Observed Coherent Trends of Surface and Upper-Air Wind Speed over China since 1960 [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(9):2891–2903.
- [17] Yang K, Ye B, Zhou D, et al. Response of Hydrological Cycle to Recent Climate Changes in the Tibetan Plateau [J]. *Climatic Change*, 2011, 109(3–4):517–534.
- [18] You Q, Sanchez-Lorenzo A, Wild M, et al. Decadal variation of surface solar radiation in the Tibetan Plateau from observations, reanalysis and model simulations [J]. *Climate Dynamics*, 2013, 40(7–8):2073–2086.
- [19] You Q, Kang S, Flügel W, et al. From brightening to dimming in sunshine duration over the eastern and central Tibetan Plateau (1961–2005) [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 101(3–4):445–457.
- [20] Yang K, Ding B, Qin J, et al. Can aerosol loading explain the solar dimming over the Tibetan Plateau? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(20).
- [21] Li Z, Wei Z, Lü S, et al. Effect of land surface processes on the Tibetan Plateau's past and its predicted response to global warming: an analytical investigation based on simulation results from the CMIP5 model [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(4):1155–1166.
- [22] Xu X, Lu C, Shi X, et al. World water tower: An atmospheric perspective [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(20):525–530.
- [23] Qinglong You, Shichang Kang, Yanhong Wu, et al. Climate change over the Yarlung Zangbo River Basin during 1961–2005 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 17(4):409–420.
- [24] Zhang Y, Liu C, Tang Y, et al. Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(D12):1103–1118.
- [25] Li X, Jin R, Pan X, et al. Changes in the near-surface soil freeze–thaw cycle on the Qinghai–Tibetan Plateau [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 17(7):33–42.
- [26] Ren L, Lin Z, Yong-jian D, et al. The Climatic Characteristics of the Maximum Seasonal Frozen Depth in the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(6):1050–1056.
- [27] Wu Q, Zhang T. Changes in active layer thickness over the Qinghai–Tibetan Plateau from 1995 to 2007 [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, 115(D9):736–744.
- [28] IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- [29] 吴国雄, 刘屹岷, 刘新, 等. 青藏高原加热如何影响亚洲季风的气候格局 [J]. *大气科学*, 2005, 29(1):47–56.
- [30] 王婉昭, 高艳红, 许建伟. 青藏高原及其周边干旱区气候变化特征与 GLDAS 适用性分析 [J]. *高原气象*, 2013, 32(3):635–645.
- [31] Wang A, Zeng X. Evaluation of multireanalysis products with in situ observations over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, 117(D5):214–221.
- [32] 王文, 汪小菊, 王鹏. GLDAS 月降水数据在中国区的适用性评估 [J]. *水科学进展*, 2014, 25(6):769–778.
- [33] M W, H G, A R, et al. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface [J]. *Science*, 2005, 308:847–850.
- [34] Moore G W K. Surface pressure record of Tibetan

Plateau warming since the 1870s [J]. Quarterly  
Journal of the Royal Meteorological Society,

2012, 138(669):1999 - 2008.

The Analysis of Underlying Variation Characteristics  
over Tibetan Plateau based on GLDAS Data

CHEN Yu-hang, FAN Guang-zhou, ZHANG Yong-li, HUA Wei, LAI Xin, ZHU Li-hua, WANG Bing-yun  
(Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** Using the monthly data of Global Land Data Assimilation System and the method of linear regression and the sliding t-test, the inter-annual variability of underlying physical variables over the Tibetan Plateau (TP) and the change's spatial distribution are initially investigated and the inter-annual variability also discussed by season in order to study the feature of underlying change over TP. The results are as follows: The underlying surface of the TP tended to warm and humid from 1948 to 2010. Energy and water cycle undergo significant change. Energy cycle trend to change faster than the hydrological cycle. The climate change of elements in all seasons exhibit different characteristics. The overall performance of the TP climate change: net shortwave radiation weakens and net long wave radiation increases. With the weakening of net short-wave radiation, sensible heat flux show the same trends. With the enhancement of total evapotranspiration, latent heat flux increases. Underlying temperature is rising and precipitation become more. Both vegetation canopy water content and surface runoff slowly increase. Soil temperature's rising make the underlying surface soil moisture increase. Surface pressure get enhanced. Wind speed tends to. Near surface specific humidity decreases. Each element has a significant regional variation.

**Key words:** atmospheric science; climate change; Tibetan Plateau; underlying; GLDAS