

巴丹吉林沙漠周边地区降水量的 季节、年和年代际变化规律及其空间差异

李万元 吕世华

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所
寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州 730000)

摘 要

本文通过对 1951-2005 年间的东亚夏季风指数及同一时段内巴丹吉林沙漠周边 17 个常规气象测站的逐月降水量和沙尘暴频次进行分析, 主要得出以下结论: 1) 巴丹吉林沙漠周边地区降水量的空间分布明显受地形影响, 紧靠沙漠的区域地势较低, 较为干旱, 各季和全年降水量也都较小; 沙漠外围, 特别是其西南边, 受祁连山区的影响, 地势较高, 气候较为湿润, 各季和全年降水量均较大; 地形的剧烈变化导致全年及各季降水的空间变化幅度均达到 1 个量级以上。然而, 研究区内高处较为湿润、并较易形成地形降水的条件更有利于增多春、秋二季的降水配额, 却不利于增多夏季降水的配额。2) 巴丹吉林沙漠周边地区降水量的夏季平均配额高达 61.6%。3) 依据各站降水量年际变化的相关系数及测站间的地域关系和地貌相似程度, 可将巴丹吉林沙漠周边地区划分成 4 个分区, 一为地势较低、紧挨沙漠、极为干旱的沙漠西北缘区, 二为土壤水较为充沛、降水气候受祁连山影响显著的沙漠西南缘区或称祁连山影响区, 三为位于巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠之间的民勤地区; 四为远离巴丹吉林沙漠、但与其周边地区地貌相似的沙漠东侧区。4) 1950s 到 2000s 的各个年代, 巴丹吉林沙漠周边四个分区各季平均降水量由大到小的排序均为: 祁连山影响区、沙漠东侧区、民勤区和沙漠西北缘区, 这一排序也是分区平均海拔由高到低的顺序; 就各季降水量及其配额的年代际演变位相而言, 祁连山影响区对巴丹吉林沙漠周边地区有很好的代表性。5) 巴丹吉林沙漠周边地区的降水量在近 35 年来 (1971-2005 年间) 有明显增大的趋势, 这种增大趋势主要体现于春季和冬季 (尤其是春季), 春季降水量的平均增大幅度为 +4.1mm/decade; 海拔越高的地区, 春季和全年降水量的增幅越大, 夏季降水量的减幅越小; 全区全年降水量的增大趋势主要得益于祁连山影响区和沙漠东侧区的贡献。6) 巴丹吉林沙漠周边地区各季及全年降水量均随东亚夏季风指数的减弱而有所增多; 冬、夏二季、及全年降水量与东亚夏季风指数间的相关系数明显受地形影响: 随海拔升高, 系数越来越小, 但其绝对值越来越大; 东亚夏季风对降水量的负影响以地势较高处 (如祁连山影响区) 更为显著。7) 逆反馈机制是巴丹吉林沙漠周边地区各季沙尘暴与降水量间的主要作用方式, 地形对降水量与沙尘暴频次间的相互作用没有明显影响。

关键词 巴丹吉林沙漠, 降水量, 年及年代际变化, 地形, 东亚夏季风, 沙尘暴

1 引言

约占我国国土面积 52% 的西北干旱半干旱区, 主要由沙漠、戈壁及稀疏植被构成, 是对全球气候变化响应最敏感的地区之一^[1-3]; 我国 70 万 km² 的沙漠中约 80% (包括塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙

漠、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠以及库姆塔格沙漠等）集中于西北干旱半干旱区，其强感热输送居欧亚大陆之最^[1-3]，正是这种强感热输送使得我国的第二大沙漠巴丹吉林沙漠（东西横跨 5 个经度，南北纵贯 3 个纬度，面积约 5.2162 万 km²）成为西北干旱区与东亚季风系统相互作用的关键环节^[1-3,4-6]。

近年来在环境变迁、气候变化和人类活动的共同影响下，我国乃至全球干旱区的水资源匮乏日益严重，水资源和水循环研究已经成为各国科学家的重要课题^[7]。降水既是淡水资源的重要来源，又是全球或各地水循环的关键环节，尤其对于干旱荒漠地区，更是人类赖以生存的重要资源，同时也是环境变迁、气候变化的直接反映^[8-9]。处于东亚夏季风西北缘的巴丹吉林沙漠，不仅具有世界上最高大的沙山，更为独特的是与总面积超过 23km²的约 144 个湖泊相伴而存，维持这种独特景观的水分来源早已引起世界科学家的高度关注^[10-17]。大量研究表明，这些湖泊的维持与周边高地或山区降水的入渗有很大关系^[10-21]。另外值得一提的是，对于多沙尘天气的沙漠及周边地区而言，降水不仅能补充土壤水分从而抑制沙尘天气的发生，还能将空气中的沙尘通过湿沉降清除干净，最终改变当地的辐射传输过程并影响区域气候^[22-23]。

有鉴于此，本文及即将完成的一系列论文拟集中精力对巴丹吉林沙漠周边地区的降水变化规律进行详细研究，以揭示其降水规律的特殊性以及导致这种特殊性的地理、气候和环流成因，并对其独特规律与地形、沙漠及东亚夏季风之间的密切联系给予特别关注^[22-30]；同时期望借此把握该区域降水对全球气候变化的响应及其在当地水资源和水循环中的重要地位，以深入理解巴丹吉林沙漠周边地区降水在沙漠湖泊维持机制中的重要作用^[7,10-21]。

2 选站依据、资料和方法介绍

本文所用资料包括巴丹吉林沙漠周边地区 17 个常规气象测站在 1951-2005 年间测得的逐月降水量资料，所选测站如图 1 所示；其实，所选区域东部的测站离巴丹吉林沙漠已经较远，只是由于这些测站也位于戈壁或沙漠附近，其植被、地貌与巴丹吉林沙漠周边地区相似，它们与巴丹吉林沙漠之间也基本没有其它观测站点，为了能够更全面地反映巴丹吉林沙漠周边地区的降水变化规律，我们把这些测站也列于研究范围内；由于缺测，各站资料的起始年份不同，终止年份相同（表 0）。为了研究地形对巴丹吉林沙漠周边地区降水规律的影响，本文也专门搜集了以上测站的海拔高度资料（图 2）。以上资料均由中国气象科学数据共享服务网提供。

表 0 所选测站降水资料的起始年份

Table 0 The beginning year of the precipitation data series at each selected gauge station

Ejinaqi	1960	Dingxin	1955
Guaizihu	1960	Gaotai	1953
Minqin	1953	Linze	1967
Hailisu	1971	Alashanyouqi	1960
Jilantai	1955	Zhangye	1951
Linhe	1957	Minle	1958
Alashanzuoqi	1953	Qilian	1957
Yinchuan	1951	Shandan	1953
		Yongchang	1959

巴丹吉林沙漠周边地区的降水会受东亚季风的影响。东亚季风的强弱由夏季风场相对冬季的季节变化强度在东亚季风区域的积分（即东亚季风指数）来表征^[29-30]。本文所用 1951-2005 年间的东亚季风资料由中科院大气物理研究所李建平研究员的个人网站慷慨提供。

和其它沙漠一样，巴丹吉林沙漠也是我国沙尘暴的高发区，其周边地区的气候与沙尘暴之间有着强烈的相互作用^[22-23,31]，因此本文也着力分析了降水气候与沙尘暴之间的相互关系，所用 1951-2005 年间的沙尘暴序列同样由中国气象科学数据共享服务网提供。

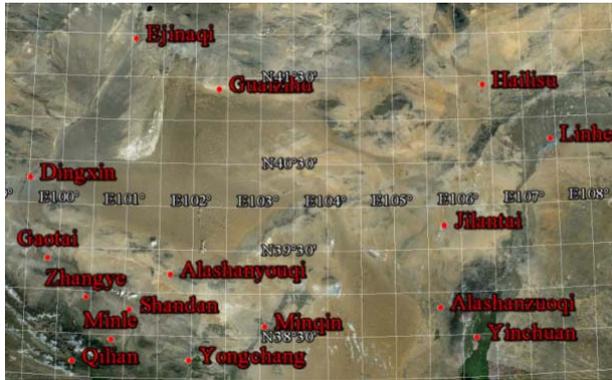


图 1 巴丹吉林沙漠及其周边测站的分布



图 2 巴丹吉林沙漠周边测站的海拔高度

Figure 1 The distribution of the gauge stations surrounding the Badanjilin Desert

Figure 2 The altitude of each selected gauge station surrounding the Badanjilin Desert

本文计算了各站各季和全年降水量及东亚季风指数在 1971-2005 年间的总体变化趋势^[32-35]，首先利用最小二乘法对各序列进行了线性拟合，然后利用线性拟合的回归方差和剩余方差（即残差）计算出满足 F 分布的 F 统计量，并据此对线性拟合结果进行了显著性水平分别为 0.05 和 0.1 的统计检验，下文中提及的通过 F 检验的趋势值即是指相应线性拟合结果通过了 F 检验。

3 分析

1) 巴丹吉林沙漠周边地区的降水气候

巴丹吉林沙漠周边地区的降水分布形势极相似于地形高度的分布（图 2 和图 3），紧靠沙漠的地区地势较低，较为干旱，各季和全年降水量也都较小；沙漠外围，特别是其西南边，受祁连山区的影响，地势较高，气候较为湿润，各季和全年降水量均较大。由表 1 可知，四季和全年降水量最小的地区均是海拔最低、位于巴丹吉林沙漠北缘的额济纳旗（9.4km）和拐子湖（9.6km），而四季和全年降水量最大的地区则均是海拔最高、位于沙漠西南边的祁连（27.9km）和民乐（22.7km）。年降水量的最小值是额济纳旗的 35.4mm，最大值是祁连的 403.5mm，全年和各季降水的空间变化幅度均高达 1 个量级以上。

就降水的季节变化而言，巴丹吉林沙漠周边各地均是以夏季降水量为最大，冬季最小，春秋二季相当，春季略少于秋季（表 1）。降水的季节配额是指某季降水占全年降水总量的百分比，表 1 同时也列出各季降水配额在巴丹吉林沙漠周边各地的统计特征：各地夏季降水占全年总量的百分比均超过 56.2%，民乐的夏季降水配额（最大）甚至达到 67.9%（表 1）；就各地平均而言，夏季降水配额为 61.6%，春、秋二季的配额分别为 16.4%和 19.6%，冬季的配额仅有 2.5%（图 4）。

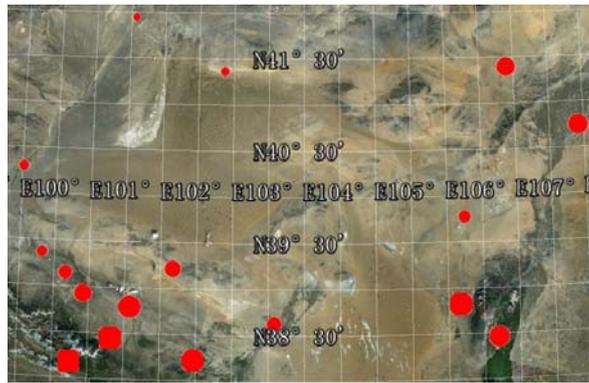


图 3 巴丹吉林沙漠周边测站的年降水量分布

Figure 3 The annual total precipitation distribution over the areas surrounding the Badanjilin Desert

表 1 巴丹吉林沙漠周边地区季节和全年降水量及各季降水配额的统计特征

Table 1 Spatial statistical characteristics of the seasonal precipitations (mm) and their percentages (%) in annual total over the areas surrounding the Badanjilin Desert

	Seasonal and annual precipitations (mm)					height	Seasonal precipitation percentages (%)			
	winter	spring	summer	autumn	annual		winter	spring	summer	autumn
min	0.5	5.5	23.1	6.3	35.4	9.4	0.8	13.5	56.2	15.6
	Guaizihu	Ejinaqi	Ejinaqi	Ejinaqi	Ejinaqi	Ejinaqi	Qilian	Hailisu	Minle	Dingxin
max	10.0	68.5	257.3	76.0	403.5	27.9	4.6	20.3	67.9	23.6
	Minle	Minle	Qilian	Qilian	Qilian	Qilian	Gaotai	Minle	Hailisu	Yongchang
median	3.6	20.0	78.1	25.6	128.1	14.5	2.1	16.6	60.9	19.0
	Hailisu	Gaotai	Zhangye	Alashanyouqi	Zhangye	Linze	Yinchuan	Zhangye	Zhangye	Linze
average	3.7	26.1	94.0	30.9	154.6	14.9	2.5	16.4	61.6	19.6

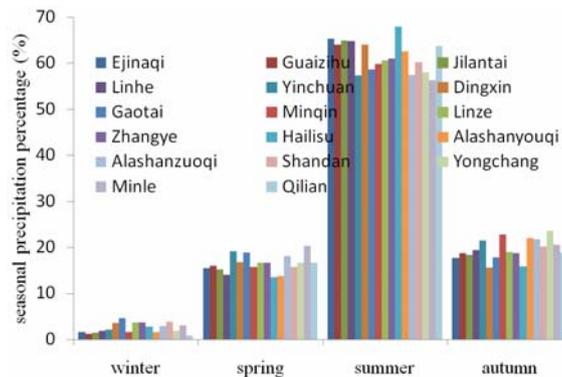


图 4 巴丹吉林沙漠周边地区各测站降水配额的季节变化

Figure 4 The seasonal variation of precipitation percentage in annual total at each gauge station surrounding the Badanjilin Desert

很明显（表 2），各季降水量与海拔高度均有很好的正相关，虽冬季相关程度较弱，但相关系数也高达 0.55。另外，降水量的空间分布在不同季节、及各季节与年总量之间的相关系数也很高，特别是春、夏、秋三季间，及三季与年总量间的相关系数均在 0.96 以上，其原因也许是该三季降水均受地形降水影响显著，且它们（特别是夏季）是降水最多的季节，全年降水主要由这三季决定。冬季与各季和全年降水量的相关系数也在 0.56 以上，这是否说明冬季降水也在很大程度上受地形降水影响，或者地形高处降水多一是地形降水所致，二是这些地方一般土壤比较湿润、水汽较易聚集所致，冬季降水量之所以表现出与地形间比较高的正相关，是由于所研究的区域正好是高处湿润、地处干燥所致，而并非地形降水在冬季仍然占决定性

作用。由图 5a 可知，随地形增高，冬季降水量仅略有加大，春、秋二季降水量加大的幅度相当，均比较强，夏季降水量加大的幅度最强，年降水量的增大幅度则是四季的叠加。

表 2 巴丹吉林沙漠周边地区季节降水量及其配额的空间分布在不同季节间的相关系数

Table 2 Spatial correlation coefficients in precipitation and its percentage against annual total between different seasons over the areas surrounding the Badanjinlin Desert

	Precipitation					Precipitation percentage in annual total			
	spring	summer	autumn	annual	height	spring	summer	autumn	height
winter	0.68	0.56	0.63	0.62	0.55	0.37	-0.35	-0.28	-0.03
spring		0.96	0.98	0.98	0.86		-0.80	0.19	0.28
summer			0.97	0.99	0.89			-0.67	-0.31
autumn				0.99	0.87				0.25
annual					0.89				

注：黄色底纹表示相关系数通过 5%显著性水平的 t 检验。

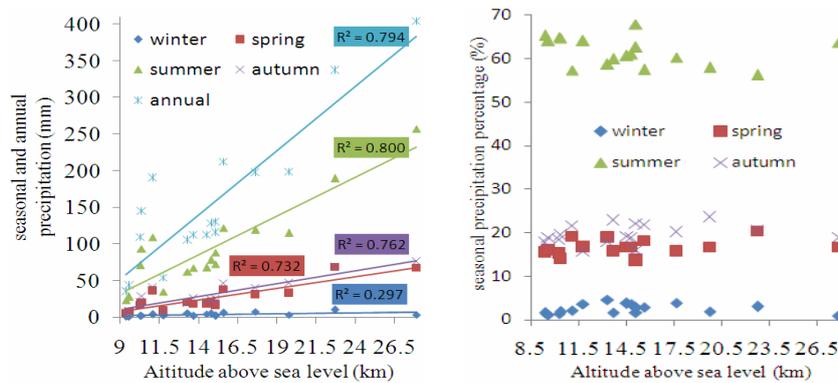


图 5 巴丹吉林沙漠周边地区各季和全年降水量及降水量的季节配额随海拔高度的变化：

(a) 季节和全年降水量；(b) 季节配额

Figure 5 The relationships of each seasonal and annual total precipitation and each seasonal precipitation percentage in annual total versus the altitude over the surrounding areas of the Badanjinlin Desert

全年降水季节配额的空间分布在不同季节间的相关系数较为复杂，但很明显，夏季降水配额与其它所有季节配额间的相关系数均为负值，特别是与春、秋二季间的负相关系数均在 0.67 以上（表 2）。当然，夏季配额多了，其它季节自然就少了；有趣的是，夏季配额与海拔间的相关系数也为负值，但春、秋二季配额与海拔间则呈量级相当的正相关，这是不是在暗示，地形对春、秋二季降水的作用更甚于对夏季降水的作用，研究区内高处湿润、并易形成地形降水的条件更有利于增多春秋二季的降水配额，却不利于增多夏季降水的配额，该问题值得深入探讨。由图 5b 可知，各季降水配额随地形变化的幅度均不是很大，其变化趋势也不大明显，这就是说，地形对巴丹吉林沙漠周边地区各季降水配额的影响不太明显。

2) 降水变化的区域性差异

依据各站降水量年际变化的相关系数及测站间的地域关系和地貌相似程度，可将巴丹吉林沙漠周边地区划分成以下几个分区^[9,28,36]：a) 西北缘区，包括额济纳旗和拐子湖两个测站，该分区地势低，紧靠沙漠，极为干旱；b) 西南缘区，包括鼎新、高台、临泽、阿拉善右旗、张掖、民乐、祁连、山丹和永昌，共 9

个测站，由于该分区的土壤水分和降水气候直接受祁连山影响，故也将之称为祁连山影响区；c) 民勤，由于民勤的降水变化规律与其它测站的相关系数都较小，以往研究也常常单独将民勤作为研究对象，故将民勤视为一个独立的分区^[19]；d) 巴丹吉林沙漠东侧区，包括海力素、吉兰太、临河、阿拉善左旗、银川，共 5 个测站。表 3a-b 分别列出各分区各季降水年际变化在测站间的相关系数，以及各分区与其它分区的平均相关系数。很明显，同一分区内各季节各测站间的相关系数都很高，不同分区间的相关系数则较低，可见分区划分的合理性；就巴丹吉林沙漠周边所有测站间的平均相关系数而言，四季和年降水的系数也都在 0.24 以上，说明这些测站均受沙漠气候的影响，在降水变化方面均存在着比较密切的相互关联。值得注意的是：春、秋两季各分区内、外测站间的相关系数虽然有较为明显的对比（分区内系数高于分区外），但都比较高，而冬、夏两季则显然是分区内的系数高于分区外，且分区外测站间的相关性明显很低（表 3c），这是不是在暗示：春、秋两季影响巴丹吉林沙漠降水天气的系统一般比冬、夏两季尺度大，这个问题值得探讨。

表 3 巴丹吉林沙漠周边各分区各季及全年降水变化在各测站间的相关系数：(a) 东侧区；(b) 祁连山影响区。

Table 3 The correlation coefficients in the year-to-year variation of each seasonal or annual total precipitation between different gauge stations in each sub-region surrounding the Badanjinlin Desert: (a) East to the Desert; (b) Areas affected by Qilian Mountain.

(a)

winter	hailisu	jilantai	linhe	alashan	spring	hailisu	jilantai	linhe	alashan	summer	hailisu	jilantai	linhe	alashan
jilantai	0.02				jilantai	0.68				jilantai	0.68			
linhe	0.57	0.54			linhe	0.63	0.81			linhe	0.45	0.46		
alashan	-0.02	0.48	0.40		alashan	0.81	0.83	0.82		alashan	0.58	0.68	0.53	
yinchuan	0.03	0.21	0.38	0.60	yinchuan	0.61	0.72	0.77	0.80	yinchuan	0.38	0.56	0.51	0.62
autumn	hailisu	jilantai	linhe	alashan	annual	hailisu	jilantai	linhe	alashan					
jilantai	0.60				jilantai	0.72								
linhe	0.57	0.69			linhe	0.50	0.52							
alashan	0.58	0.77	0.58		alashan	0.68	0.68	0.60						
yinchuan	0.55	0.56	0.35	0.73	yinchuan	0.36	0.52	0.57	0.61					

(b)

winter	gaotai	linze	alashanyouqi	zhangye	minle	qilian	shandan	yongchang
dingxin	0.39	0.31	0.33	0.42	0.39	0.12	0.36	0.14
gaotai		0.73	0.41	0.71	0.58	0.17	0.65	0.41
linze			0.41	0.65	0.47	0.29	0.50	0.55
alashanyouqi				0.56	0.56	0.23	0.19	0.50
zhangye					0.56	0.23	0.69	0.40
minle						0.23	0.45	0.47
qilian							0.19	0.31
shandan								0.50
spring	gaotai	linze	alashanyouqi	zhangye	minle	qilian	shandan	yongchang
dingxin	0.60	0.51	0.62	0.54	0.49	0.47	0.58	0.44
gaotai		0.89	0.83	0.89	0.70	0.51	0.85	0.70
linze			0.77	0.94	0.73	0.54	0.81	0.67
alashanyouqi				0.80	0.77	0.60	0.80	0.77

zhangye					0.81	0.61	0.86	0.74
minle						0.64	0.77	0.75
qilian							0.53	0.64
shandan								0.76
summer	gaotai	linze	alashanyouqi	zhangye	minle	qilian	shandan	yongchang
dingxin	0.67	0.57	0.67	0.31	0.41	0.26	0.33	0.34
gaotai		0.82	0.60	0.59	0.54	0.44	0.54	0.42
linze			0.68	0.85	0.70	0.40	0.68	0.51
alashanyouqi				0.56	0.57	0.30	0.64	0.62
zhangye					0.81	0.50	0.77	0.60
minle						0.59	0.63	0.61
qilian							0.51	0.43
shandan								0.59
autumn	gaotai	linze	alashanyouqi	zhangye	minle	qilian	shandan	yongchang
dingxin	0.79	0.69	0.54	0.49	0.52	0.28	0.51	0.51
gaotai		0.90	0.74	0.80	0.80	0.40	0.74	0.60
linze			0.80	0.90	0.85	0.54	0.84	0.72
alashanyouqi				0.80	0.80	0.47	0.81	0.64
zhangye					0.85	0.49	0.86	0.59
minle						0.65	0.87	0.74
qilian							0.63	0.66
shandan								0.78
annual	gaotai	linze	alashanyouqi	zhangye	minle	qilian	shandan	yongchang
dingxin	0.65	0.55	0.56	0.42	0.39	0.23	0.36	0.25
gaotai		0.80	0.55	0.65	0.56	0.33	0.62	0.39
linze			0.64	0.90	0.64	0.30	0.73	0.38
alashanyouqi				0.59	0.47	0.33	0.68	0.46
zhangye					0.70	0.42	0.84	0.46
minle						0.57	0.62	0.45
qilian							0.54	0.43
shandan								0.58

注：以上表格中 alashan 代替 alashanzuoqi.

3) 各季及全年、各区及全区降水量及其贡献的年代际变化

从 1950s 到 2000s, 在任一年代, 巴丹吉林沙漠周边地区各季降水量的空间分布均明显表现出随海拔升高而加大的趋势 (图略); 在所有年代, 四个分区中各季降水量由大到小的排序均为: 西南缘区或祁连山影响区、东侧区、民勤、西北缘区 (图 6a-e), 这一排序也是分区平均海拔由高到低的顺序; 全区各季或全年降水量的年代际演变位相总是与西南缘分区的位相甚为一致, 说明就降水量的年代际演变情况而言, 祁连山影响区在很大程度上可以代表巴丹吉林沙漠的周边地区 (图 6a-e); 另外, 各年代各区的降水量都是在夏季最大, 冬季最小, 春秋二季相当 (表 4)。降水量的年代际变化情况在各分区和各季节之间还有更为复杂的异同, 这里就不再一一列举, 表 4 列出各年代各分区在各季节的平均降水量, 以供参考。

表 3c 巴丹吉林沙漠周边各分区各季及全年降水变化在各分区内、外测站间的平均相关系数

Table 3c The correlation coefficients in the year-to-year variation of each seasonal or annual total precipitation between different gauge stations, spatially averaged respectively inside and outside each sub-region surrounding the Badanjilin Desert

		winter	spring	summer	autumn	year
西北缘区	分区内	0.49	0.76	0.68	0.62	0.73
	分区外	0.11	0.35	0.19	0.38	0.19
西南缘区或 祁连山影响区	分区内	0.42	0.69	0.56	0.68	0.53
	分区外	0.15	0.52	0.18	0.45	0.21
民勤	分区外	0.30	0.61	0.31	0.57	0.29
东侧区	分区内	0.32	0.75	0.54	0.60	0.58
	分区外	0.15	0.55	0.18	0.48	0.25
全区		0.24	0.58	0.32	0.53	0.34

注：黄色底纹的数值表示通过 95% 信度水平的 t 检验。

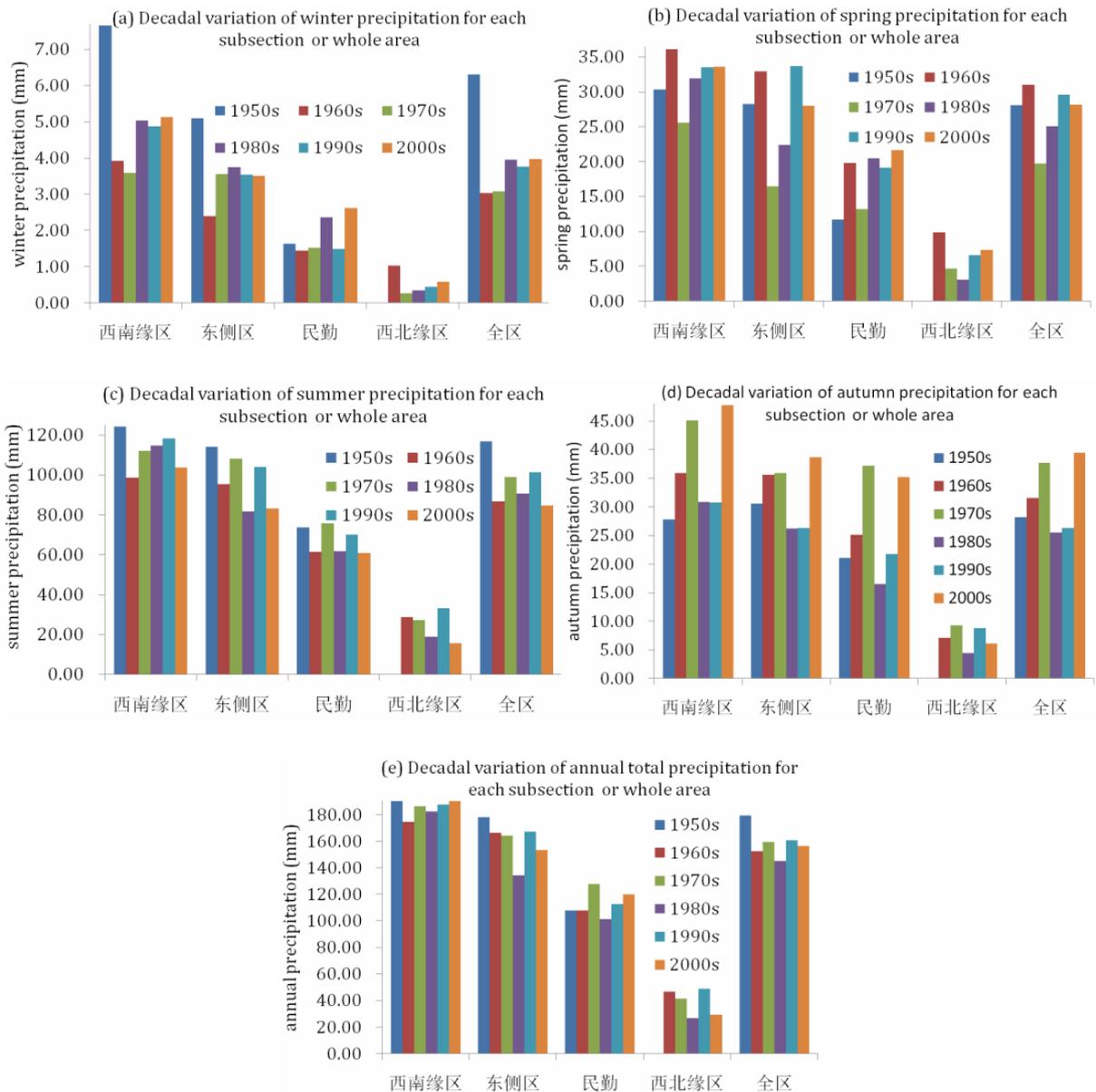


图 6 巴丹吉林沙漠周边各分区各季节和全年降水量在 1951-2005 年间的年代际变化：

(a) 冬季；(b) 春季；(c) 夏季；(d) 秋季；(e) 全年。

Table 6 The decadal variation during 1951-2005 of each seasonal or annual total precipitation for each sub-region surrounding the

Badanjilin Desert: (a) winter; (b) spring; (c) summer; (d) autumn; (e) annual.

表 4 1951-2005 年间巴丹吉林沙漠周边各分区各年代各季及全年平均降水量 (mm)

Table 4 Each seasonal or annual total precipitation averaged through each decade during 1951-2005 for each sub-region surrounding the Badanjilin Desert (mm)

		1950s	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s			1950s	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s
		winter	spring	summer	autumn	annual	winter			spring	summer	autumn	annual		
西南缘区	winter	7.7	3.9	3.6	5.0	4.9	5.1	民勤	winter	1.6	1.5	1.5	2.4	1.5	2.6
	spring	30.3	36.2	25.6	32.0	33.6	33.6		spring	11.7	19.8	13.2	20.5	19.1	21.7
	summer	124.4	98.6	112.1	114.7	118.4	103.6		summer	73.5	61.5	75.8	61.9	70.2	60.8
	autumn	27.8	35.9	45.1	30.9	30.7	47.8		autumn	21.1	25.1	37.2	16.5	21.7	35.2
	annual	190.2	174.6	186.5	182.5	187.6	190.1		annual	108.0	107.9	127.6	101.2	112.6	120.2
东侧区	winter	5.1	2.4	3.6	3.8	3.5	3.5	西北缘区	winter		1.0	0.3	0.4	0.4	0.6
	spring	28.2	33.0	16.4	22.4	33.7	28.0		spring		9.9	4.7	3.1	6.6	7.3
	summer	114.3	95.3	108.2	81.8	103.9	83.3		summer		28.8	27.3	18.9	33.0	15.5
	autumn	30.5	35.6	35.9	26.2	26.3	38.7		autumn		7.1	9.3	4.5	8.8	6.1
	annual	178.2	166.3	164.0	134.1	167.5	153.6		annual		46.8	41.6	26.8	48.8	29.5
全区	winter	6.3	3.0	3.1	3.9	3.8	4.0								
	spring	28.1	31.1	19.7	25.1	29.6	28.2								
	summer	116.8	86.7	98.8	90.6	101.3	84.8								
	autumn	28.2	31.6	37.7	25.5	26.3	39.5								
	annual	179.3	152.4	159.4	145.2	160.9	156.4								

同降水量的年代际演变情况相似, 就各季降水量对全年总量的贡献或降水量季节配额的年代际变化而言, 祁连山影响区对巴丹吉林沙漠周边地区仍然具有非常好的代表性, 前者的变化位相与后者完全一致(图 7a-d)。与降水量不同的是, 在各个年代, 各季降水配额的空间分布都与海拔高度没有明显的关系(图 7a-d)。

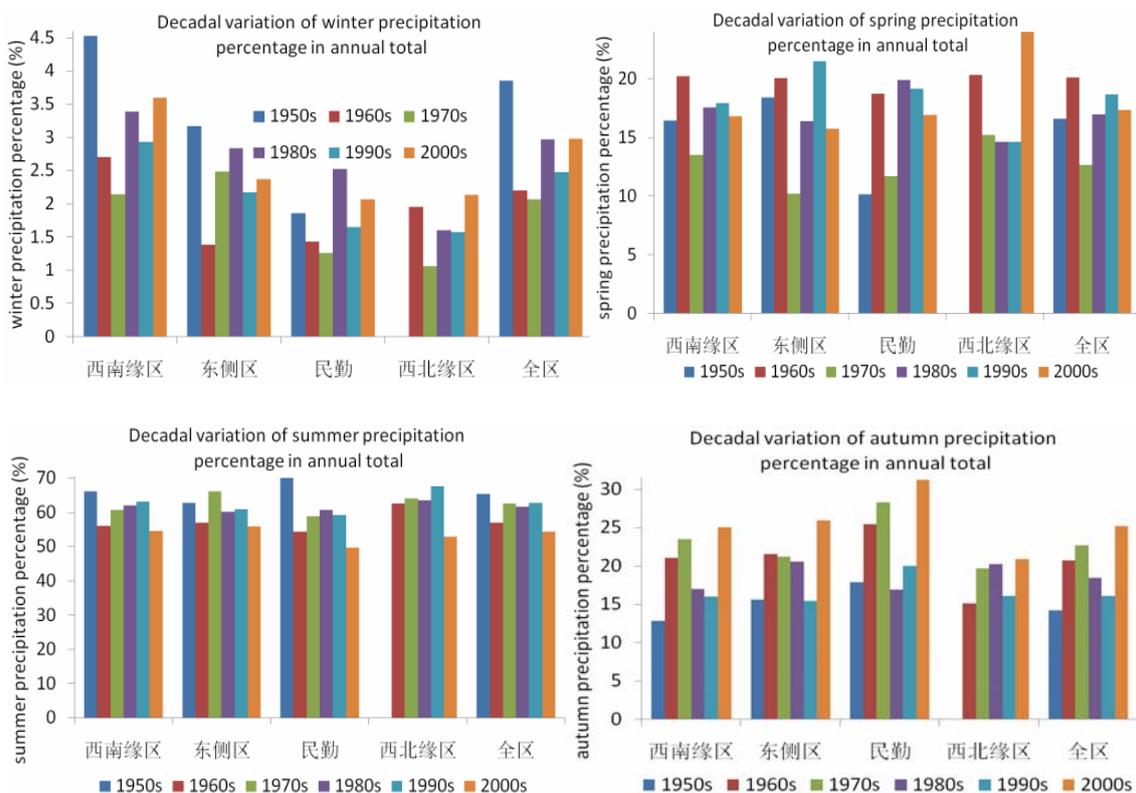
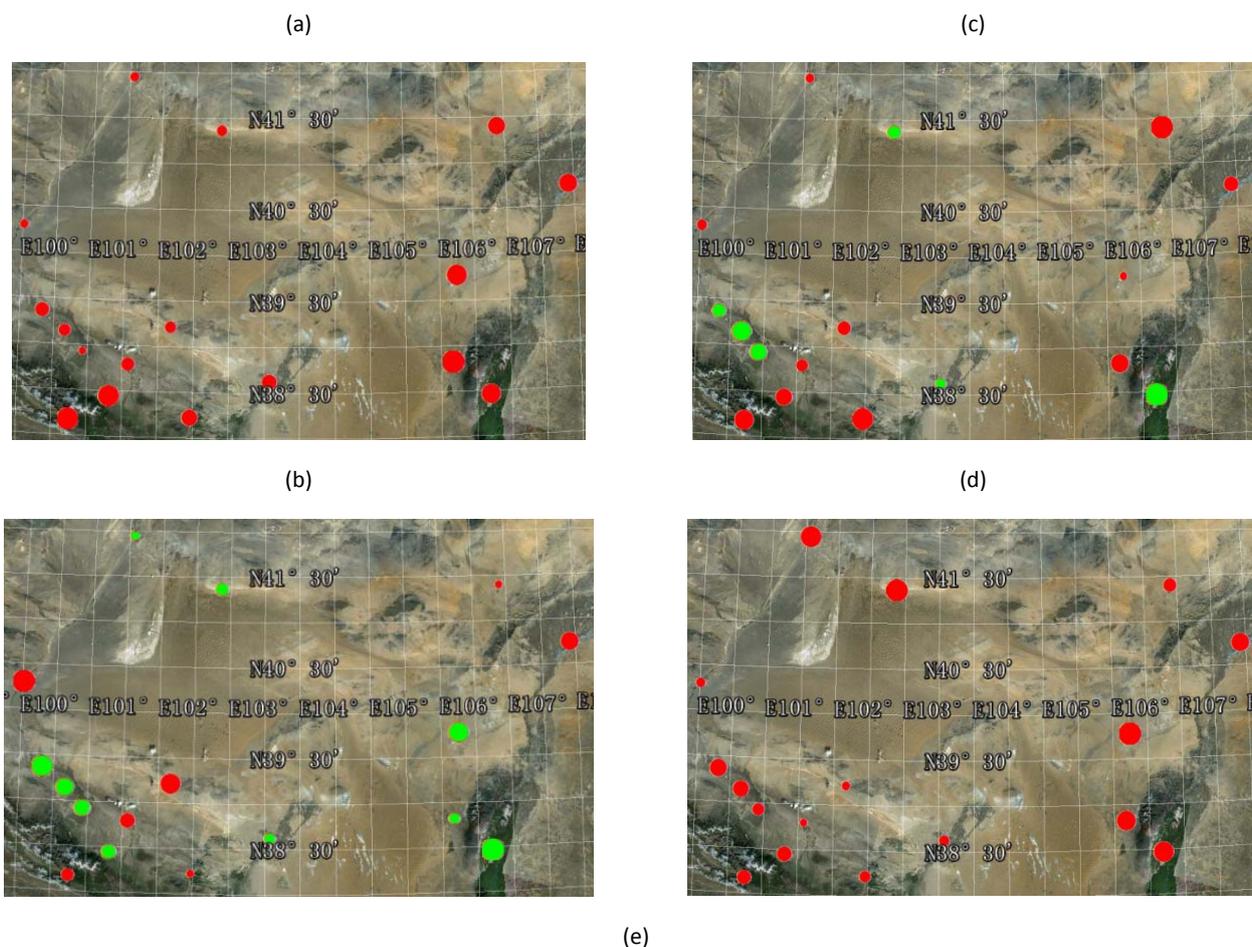


图 7 巴丹吉林沙漠周边各分区各季降水量配额在 1951-2005 年间的年代际变化: (a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季

Figure 7 The decadal variation during 1951-2005 of each seasonal precipitation percentage in annual total for each sub-region surrounding the Badanjilin Desert: (a) winter; (b) spring; (c) summer; (d) autumn

4) 各季、全年降水量及其贡献年际变化趋势的空间分布

巴丹吉林沙漠周边各地各季节降水量在最近 35 年来 (1971-2005) 的总体变化趋势不大一致 (表 5a, 图 8a-c): 只有春季降水量在各地均表现为增大趋势, 且春季有近一半测站的增大趋势通过信度为 90% 的 F 检验, 周边所有测站春季降水量的平均变化趋势为 +4.1mm/decade; 其次, 冬季降水量的增大趋势也较为明显, 17 个测站中有 12 个表现为增大趋势, 其中有 4 个测站的增大趋势通过信度为 90% 的 F 检验, 其余 5 个表现为减小趋势的测站中仅有 1 个通过信度为 90% 的 F 检验, 冬季降水量在沙漠周边所有测站的平均趋势为 +0.34mm/decade; 夏、秋二季降水量的平均趋势均为负值 (分别为 -1.02mm/decade 和 -0.81mm/decade), 前 (后) 者有 10 (12) 个测站表现为减小趋势, 两季所有测站的所有趋势均未通过信度为 90% 的 F 检验; 对于全年降水量而言, 有 11 个测站表现为增大趋势, 平均趋势为 +2.62mm/decade, 很明显, 这种正趋势主要来自春、冬二季 (特别是春季) 降水的贡献; 总之, 巴丹吉林沙漠周边地区的降水量在近 35 年来有明显增大的趋势, 这种增大趋势主要体现于春季和冬季 (尤其是春季) 降水量均明显增加, 也正因如此, 图 8 中表示春、冬二季降水量变化趋势的点大都集中于 0 线以上, 而夏、秋季节的点则主要分布于 0 线之下。



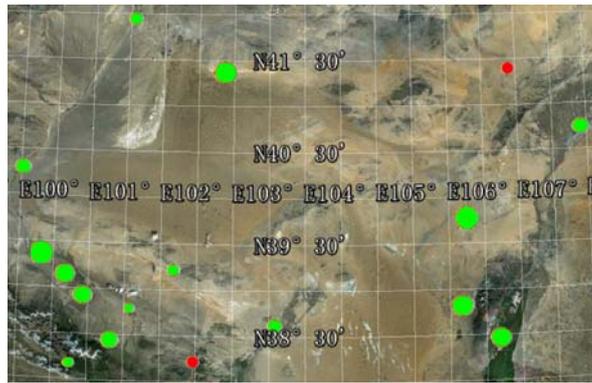


图 8 巴丹吉林沙漠周边地区季节和全年降水量及降水量季节配额在 1971-2005 年间总体变化趋势的空间分布 (图中红色圆点表示增大趋势, 绿色圆点表示减小趋势): (a) 春季降水量; (b) 夏季降水量; (c) 全年降水量; (d) 春季降水量配额; (e) 夏季降水量配额。

Figure 8 The spatial distribution of the general variation tendency during 1971-2005 of each seasonal or annual total precipitation and each seasonal precipitation percentage in annual total over the surrounding areas of the Badanjilin Desert (The red circular dots represent the increasing trends, and the blue ones decreasing): (a) winter precipitation; (b) summer precipitation; (c) annual total; (d) spring precipitation percentage; (e) summer precipitation percentage.

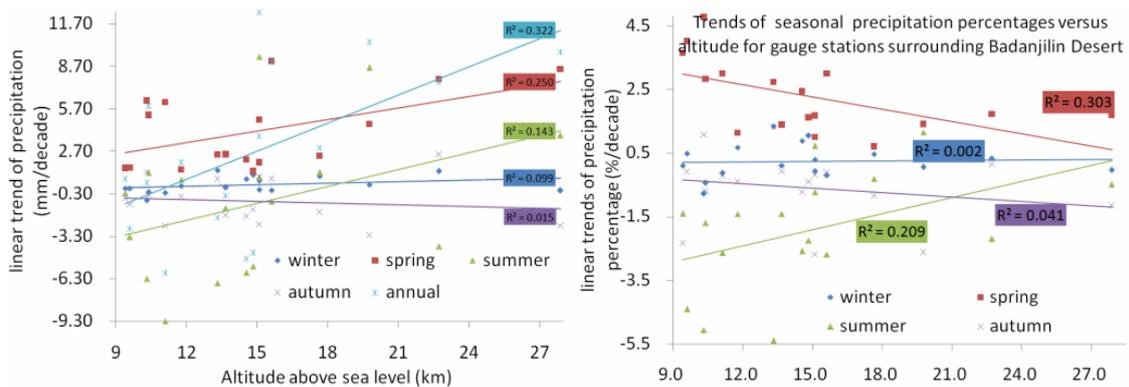


图 9 巴丹吉林沙漠周边地区季节和全年降水量及降水量季节配额在 1971-2005 年间的总体变化趋势随海拔高度的变化: (a) 降水量; (b) 降水量季节配额。

Figure 9 The variation against the altitude of the general variation tendency during 1971-2005 of each seasonal or annual total precipitation and each seasonal precipitation percentage in annual total within the surrounding areas of the Badanjilin Desert: (a) seasonal or annual precipitation; (b) seasonal precipitation percentage.

近 35 年来, 巴丹吉林沙漠周边地区春、夏两季降水量的变化趋势有随海拔升高而明显加大的空间分布趋向 (图 8a-b, 图 9a), 即春季降水的增大幅度随海拔升高而变大, 夏季降水的减小幅度随海拔升高而变小, 其增大幅度则随海拔升高而变大, 也就是说, 海拔越高的地方春、夏两季降水量的增幅越大, 海拔越低的地方春季降水量的增幅越小, 夏季降水量非但增幅越来越小, 好多地方都表现为减小趋势, 且减幅越来越大。冬、秋两季降水量变化趋势的空间分布基本与海拔高度没有明显的相关。受春、夏季降水的影响, 全年降水量变化趋势的空间分布也表现出明显的随海拔升高而变大的趋向 (图 8c, 图 9a)。

不同分区的降水量变化趋势既有相似之处, 也有不同之处: 各分区所有测站春季降水量的变化趋势均为正值; 夏、秋两季降水量变化趋势均为负值; 西北缘区、西南缘区及民勤等, 所有测站的冬季降水量均为增大趋势 (除祁连为微弱的减小趋势外), 只有东侧区是减小趋势; 全年降水量的变化趋势在西北缘区

和民勤为弱负值（分别为-1.01mm/decade 和-0.45mm/decade），在西南侧区和东侧区为较大的正值（+2.78mm/decade 和+4.4mm/decade），也就是说，巴丹吉林沙漠周边地区全年降水的增大趋势主要得益于祁连山影响区和东侧区的贡献。

表 5 巴丹吉林沙漠周边各地各季及全年降水量、以及降水量季节配额在最近 35 年来（1971-2005）的总体变化趋势（mm/decade）：(a) 降水量；(b) 降水配额。

Table 5 The general variation tendency during 1971-2005 of each seasonal or annual total precipitation and each seasonal precipitation percentage in annual total at each gauge station surrounding the Badanjilin Desert: (a) seasonal or annual precipitation; (b) seasonal precipitation percentage

(a)

		winter	spring	summer	autumn	annual			winter	spring	summer	autumn	annual
沙漠西北缘区	Ejinaqi	0.09	1.52	-0.25	-0.61	0.74	祁连山影响区	Dingxin	0.28	1.41	0.70	-0.47	1.92
	Guaizihu	0.09	1.53	-3.34	-1.05	-2.76		Gaotai	1.36	2.47	-6.59	0.78	-1.98
	average	0.09	1.52	-1.79	-0.83	-1.01		Linze	0.75	2.12	-5.85	-1.89	-4.87
	positive	2	2	0	0	1		Alashanyouqi	0.00	1.93	0.89	0.92	3.74
	negative	0	0	2	2	1		Zhangye	1.05	1.30	-5.41	-1.40	-4.46
沙漠东侧区	Hailisu	0.65	4.92	9.39	-2.45	12.51		Minle	1.31	7.78	-4.01	2.49	7.57
	Jilantai	-0.75	6.28	-6.28	1.24	0.50		Qilian	-0.07	8.49	3.82	-2.55	9.70
	Linhe	-0.19	5.26	1.19	-0.38	5.89		Shandan	0.95	2.37	1.21	-1.57	2.95
	Alashanzuoqi	-0.03	9.07	-0.84	0.77	8.98		Yongchang	0.37	4.64	8.62	-3.21	10.41
	Yinchuan	-0.21	6.17	-9.29	-2.55	-5.89		average	0.67	3.61	-0.74	-0.77	2.78
	average	-0.11	6.34	-1.16	-0.67	4.40	positive	8	9	5	3	6	
	positive	1	5	2	2	4	negative	1	0	4	6	3	
	negative	4	0	3	3	1	民勤	Minqin	0.16	2.50	-1.32	-1.79	-0.45
全区	average	0.34	4.10	-1.02	-0.81	2.62	全区	positive	12	17	7	5	11
	通过检验	5	8	0	0	1		negative	5	0	10	12	6

(b)

		winter	spring	summer	autumn			winter	spring	summer	autumn
西北缘区	Ejinaqi	0.1	3.6	-1.4	-2.3	西南缘区	Dingxin	0.7	1.1	-1.4	-0.4
	Guaizihu	0.5	4.0	-4.4	-0.1		Gaotai	1.3	2.7	-5.4	1.3
	average	0.3	3.8	-2.9	-1.2		Linze	0.9	2.4	-2.6	-0.7
	positive	2	2	0	0		Alashanyouqi	-0.1	1.0	-0.7	-0.2
	negative	0	0	2	2		Zhangye	1.0	1.6	-2.2	-0.4
东侧区	Hailisu	0.3	1.7	0.7	-2.7		Minle	0.3	1.7	-2.2	0.1
	Jilantai	-0.8	4.8	-5.1	1.1		Qilian	0.0	1.7	-0.5	-1.1
	Linhe	-0.4	2.8	-1.7	-0.7		Shandan	0.5	0.7	-0.3	-0.9
	Alashanzuoqi	-0.2	3.0	-2.7	-0.1		Yongchang	0.1	1.4	1.2	-2.6
	Yinchuan	-0.1	3.0	-2.6	-0.2		average	0.5	1.6	-1.6	-0.5
	average	-0.3	3.1	-2.3	-0.5	positive	7	9	1	2	
	positive	1	6	1	1	negative	2	0	8	7	
全区	negative	5	0	5	5	民勤	Minqin	0.1	1.4	-1.4	-0.1
	positive	11	17	2	3	全区	通过检验	6	4	1	0
	negative	6	0	15	14		average	0.2	2.3	-1.9	-0.6

黄色代表相关系数通过显著性水平为 0.05 的 F 检验，绿色的显著性水平为 0.1，白色没有通过两种显著性水平的 F 检验。

和季节降水量的变化趋势相似，巴丹吉林沙漠周边地区降水季节配额近 35 年来的总体变化也是在冬、春二季表现为明显的加大趋势，在夏、秋二季则表现为减小趋势（表 5b）。春季降水配额趋势在所有测站均为正值，其中有 4 个测站通过信度为 90%的 F 检验，和降水量一样，西北缘区的两个测站均通过 F 检验，说明西北缘区春季降水量和降水配额的增大趋势最为可信、也最为显著，其平均趋势分别为 +1.52mm/decade 和 +3.8%/decade。冬季降水配额变化趋势除 6 个测站为负值外，其余 11 个测站均为正值；和降水量趋势一样，负值主要出现在东侧区，其中吉兰泰的负值也通过信度为 90%的 F 检验；其余 6 个通过 F 检验的测站均为正值，主要出现在西南缘区，冬季降水量趋势通过 F 检验的其余 4 个正值也出现在该分区，说明西南缘区冬季降水配额和降水量一样，在近 35 年来确有加大趋势，尽管量值仅为 +0.5%/decade；冬季降水配额和降水量一样，除了在沙漠东侧区表现为较为明显的减小趋势外，在其余分区均为增大趋势。夏季降水配额也和降水量一致，在各分区均表现为减小趋势，除西南缘区和东侧区分别有 1 个测站趋势为正值外，其余 15 个测站均为负值；秋季配额和夏季相似，所有测站中除 3 个为正值外，其余 14 个均为负值，各分区的平均值也均为负值，说明巴丹吉林沙漠周边地区夏、秋两季的降水量及其配额在近 35 年来确有下降趋势。

各季降水配额在近 35 年来的变化趋势随海拔高度的变化与季节降水量趋势既有相同之处，也有不同之处（图 9a-b）：冬、秋两季配额和降水量相同，其变化趋势基本与海拔高度无明显关系；夏季配额和降水量的变化趋势均随海拔增高而加大，只是前者有更多测站的趋势为负值，这意味着，随着海拔升高，夏季降水配额的减小幅度越来越小；最为明显的不同在于春季，尽管配额和降水量的趋势一样均为正值，然而配额的增幅却随海拔升高而明显减小，这正好与降水量增幅明显加大相反，说明地势越高，春季降水配额的增幅越小，地势越低，增幅越大，配额变大越明显，这也正是巴丹吉林沙漠西北缘区春季降水配额增大最为可信、最为明显的原因所在。

5) 巴丹吉林沙漠周边地区降水量与东亚夏季风指数的关系

巴丹吉林沙漠周边地区各季和全年降水量与东亚夏季风指数的相关系数以负值为主（表 6）：17 个测站中，冬、春、夏、秋四季、及全年分别有 14、10、15、10 和 14 个测站相关系数为负值，且通过 0.1 显著性水平 t 检验的相关系数中仅有 1 个是正值（春季、拐子湖），其余 25 个均为负值；这些通过 t 检验的值主要分布在祁连山影响区，该分区所有测站冬、夏两季、及全年降水量与东亚夏季风指数的相关系数为负值，且基本都通过了 t 统计检验。春、秋两季分别仅有拐子湖和海力素的相关系数通过 t 检验。这种负相关为主的状况说明，巴丹吉林沙漠周边地区的季节和年降水量均随着东亚夏季风指数的减弱（1971-2005 年间，东亚夏季风指数在 6、7、8 月和全季的总体变化趋势分别为 -0.02/decade，-0.04/decade，-0.04/decade 和 -0.03/decade，均未通过显著性水平为 0.1 的 F 检验）而有所增多，这和前人针对我国西北干旱半干旱区东部降水的研究成果有很好的的一致性^[25,27,34-35]。

冬、夏二季、及全年降水量与东亚夏季风指数间相关系数在巴丹吉林沙漠周边地区的空间分布似乎明显受海拔高度的影响：随海拔升高，相关系数越来越小（图 10a），但其绝对值却越来越大（图 10b），说明东亚夏季风对巴丹吉林沙漠周边地区冬、夏二季、及全年降水量的负影响以地势较高处（如以上所谈到的祁连山影响区）更为显著。东亚夏季风指数和本站各季降水配额间的相关系数只有 5 个值通过了 t 检验，这里不做讨论；为了使读者更全面地把握东亚夏季风对巴丹吉林沙漠周边地区降水量的影响状况，表 7 列

出各站各季降水量与东亚夏季各月季风指数间的相关系数，以供查阅。

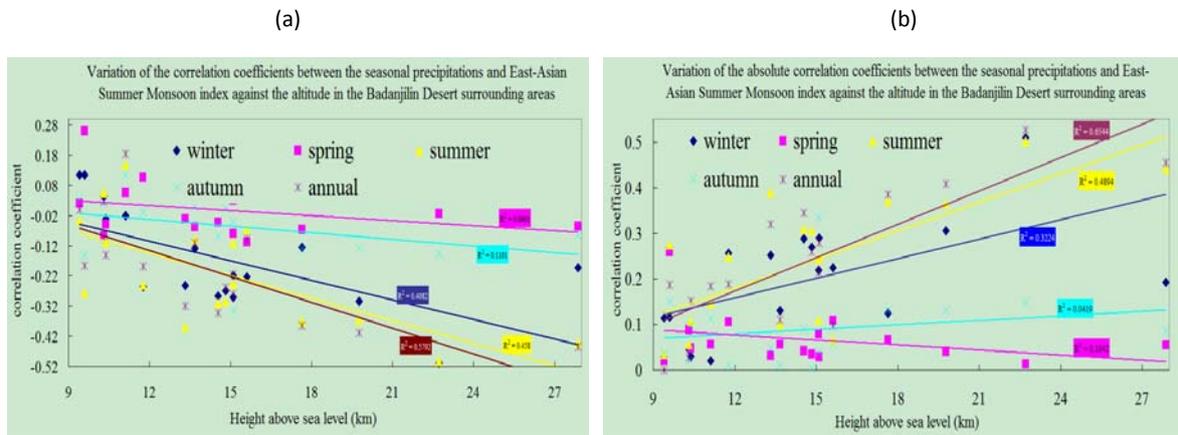


图 10 巴丹吉林沙漠周边地区各季及全年降水量与东亚夏季季风指数间的相关系数(a)及其绝对值(b)随海拔高度的变化
Figure 10 The variations against the altitude of the correlation coefficient (a) and its absolute value (b) between the seasonal or annual total precipitation and the East-Asian Summer Monsoon Index within the surrounding areas of the Badanjilin Desert

表 6 巴丹吉林沙漠周边各地各季及全年降水量与东亚夏季季风指数的相关系数

Table 6 The correlation coefficient between the seasonal or annual total precipitation and the East-Asian Summer Monsoon Index at each gauge station surrounding the Badanjilin Desert

分区	测站	winter	spring	summer	autumn	year
西北 缘区	Ejinaqi	0.11	0.02	-0.04	0.04	0.00
	Guaizihu	0.12	0.26	-0.28	-0.15	-0.19
西南 缘区	Dingxin	-0.26	0.11	-0.25	-0.01	-0.19
	Gaotai	-0.25	-0.03	-0.39	0.05	-0.32
	Linze	-0.29	-0.04	-0.31	-0.09	-0.34
	Alashanyouqi	-0.29	0.03	-0.24	-0.04	-0.28
	Zhangye	-0.27	0.03	-0.31	0.00	-0.26
	Minle	-0.51	-0.01	-0.50	-0.15	-0.53
	Qilian	-0.19	-0.06	-0.44	-0.09	-0.45
	Shandan	-0.12	-0.07	-0.37	-0.13	-0.38
Yongchang	-0.31	0.04	-0.37	-0.13	-0.41	
民勤	Minqin	-0.13	-0.06	-0.10	0.01	-0.11
沙漠 东侧 区	Hailisu	-0.22	-0.08	-0.11	-0.33	-0.21
	Jilantai	0.04	-0.09	0.06	0.02	0.03
	Linhe	-0.03	-0.05	-0.11	-0.10	-0.15
	Alashanzuoqi	-0.22	-0.11	-0.07	0.06	-0.10
	Yinchuan	-0.02	0.06	0.15	0.11	0.18

黄色代表相关系数通过显著性水平为 0.05 的 t 检验，绿色的显著性水平为 0.1，白色没有通过两种显著性水平的 t 检验。

6) 巴丹吉林沙漠周边地区各季降水量与沙尘暴的关系

众所周知，沙尘暴与降水间的相互作用机制一般为：降水越多，地表越潮湿，沙尘越不易被风力卷入空中，沙尘暴也越难形成；沙尘暴越多，进入空气中的尘粒也越多，这些尘粒会使云中的水汽分布更为分

散, 最终使之难以达到饱和或形成可克服空气阻力下降到地面的雨滴而形成降水, 降水量自然也就减少, 也就是说, 沙尘暴和降水量之间存在一种逆反馈机制; 同时, 沙尘暴也会使空气中利于降水形成的凝结核增多, 且沙尘暴一般总与冷空气入侵相伴, 气温下降, 凝结核增多, 都有利于降水的发生或降水量的增加, 这就会形成沙尘暴与降水量之间的某种正相关。巴丹吉林沙漠周边各地各季和全年降水量与沙尘暴频次间的相关系数是以负值为主 (表 8): 冬、春、秋三季 17 个测站中分别只有 2 个测站的相关系数为正值, 夏季正、负相关系数的测站数相当; 所有通过显著性水平分别为 0.05 和 0.1 的 t 统计检验的相关系数 (共 14 个值) 均为负值, 只有 1 个除外, 由此可以推断, 逆反馈机制是巴丹吉林沙漠周边各地各季沙尘暴与降水量间的主要作用方式。另外, 本文还专门分析了各季、及全年降水量与沙尘暴频次间的相关系数随海拔高度的变化情况, 结果发现, 地形对降水量与沙尘暴频次间的相关性没有明显影响。

表 8 巴丹吉林沙漠周边各地各季及全年降水量与沙尘暴频次在 1953-2005 年间年际变化的相关系数

Table 8 The correlation coefficient in the year-to-year variation during 1953-2005 between the seasonal or annual total precipitation and dust storm frequency at each gauge station surrounding the Badanjilin Desert

分区	测站	winter	spring	summer	autumn	year
沙漠西北缘区	Ejinaqi	-0.08	0.01	-0.30	-0.24	-0.24
	Guaizihu	-0.03	-0.43	-0.12	-0.06	-0.11
祁连山影响区	Dingxin	-0.17	-0.14	-0.08	-0.08	-0.03
	Gaotai	-0.21	-0.08	0.14	-0.31	0.10
	Linze	-0.27	-0.16	-0.05	-0.10	0.30
	Alashanyouqi	0.14	-0.22	0.14	-0.23	0.14
	Zhangye	-0.16	-0.01	-0.15	-0.15	0.08
	Minle	-0.15	-0.09	0.04	-0.23	0.09
	Qilian	-0.28	0.12	DSF=0	DSF=0	-0.27
	Shandan	-0.06	-0.14	0.04	-0.25	0.00
	Yongchang	-0.22	-0.15	-0.26	-0.33	-0.29
	民勤	Minqin	-0.21	-0.17	0.12	-0.25
沙漠东侧区	Hailisu	-0.15	-0.24	-0.24	-0.25	-0.28
	Jilantai	0.10	-0.21	0.18	0.02	0.06
	Linhe	-0.06	-0.04	-0.17	-0.23	-0.13
	Alashanzuoqi	-0.08	-0.05	0.07	0.05	-0.02
	Yinchuan	-0.32	-0.20	-0.06	-0.31	-0.03
全区	positive	2	2	7	2	6
	negative	15	15	9	14	11

注: 表中 DSF=0 表示相应沙尘暴频次序列中的元素恒为 0。黄色代表相关系数通过显著性水平为 0.05 的 t 检验, 绿色的显著性水平为 0.1, 白色没有通过两种显著性水平的 t 检验。

	1951-2005 contemporary relation					1951-2005 previous rain later dust storm			
	year	winter	spring	summer	autumn	winter	spring	summer	autumn
xibeiyanqu	-0.20	-0.06	-0.24	-0.22	-0.16	-0.13	-0.11	0.07	-0.04
qilianshanqu	-0.25	-0.04	-0.23	-0.15	-0.32	-0.03	-0.33	0.06	-0.10
dongcequ	0.01	-0.16	-0.20	0.05	-0.18	-0.04	-0.09	0.04	-0.08
quanqu	0.04	0.07	-0.19	0.04	0.06	-0.19	-0.20	0.10	0.11

1975-2005	contemporary rain and precipitation					previous rain later dust storm			
	year	winter	spring	summer	autumn	winter	spring	summer	autumn
xibeiyanqu	-0.26	-0.19	-0.51	-0.22	-0.10	-0.09	-0.30	-0.03	0.07
qilianshanqu	0.09	-0.25	-0.25	0.09	-0.21	-0.40	-0.42	0.26	0.02
dongcequ	-0.16	-0.21	-0.23	-0.17	-0.30	-0.24	-0.24	-0.03	0.01
quanqu	0.05	-0.29	-0.25	0.04	-0.25	-0.42	-0.34	0.19	0.06

4 结论和讨论

本文通过对 1951-2005 年间的东亚夏季风指数及同一时段内巴丹吉林沙漠周边 17 个常规气象测站的逐月降水量和沙尘暴频次进行分析, 主要得出以下结论: 1) 巴丹吉林沙漠周边地区降水量的空间分布明显受地形影响: 紧靠沙漠的区域地势较低, 较为干旱, 各季和全年降水量也都较小; 沙漠外围, 特别是其西南边, 受祁连山区的影响, 地势较高, 气候较为湿润, 各季和全年降水量均较大; 地形的剧烈变化导致全年及各季降水的空间变化幅度均达到 1 个量级以上。然而, 研究区内高处较为湿润、并较易形成地形降水的条件更有利于增多春、秋二季的降水配额, 却不利于增多夏季降水的配额。2) 巴丹吉林沙漠周边地区降水量的夏季平均配额高达 61.6%。3) 依据各站降水量年际变化的相关系数及测站间的地域关系和地貌相似程度, 可将巴丹吉林沙漠周边地区划分成 4 个分区, 一为地势较低、紧挨沙漠、极为干旱的沙漠西北缘区, 二为土壤水分较为充沛、降水气候受祁连山影响显著的沙漠西南缘区或称祁连山影响区, 三为位于巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠之间的民勤地区; 四为远离巴丹吉林沙漠、但与其周边地区地貌相似的沙漠东侧区。4) 1950s 到 2000s 的各个年代, 巴丹吉林沙漠周边四个分区各季平均降水量由大到小的排序均为: 祁连山影响区、沙漠东侧区、民勤区和沙漠西北缘区, 这一排序也是分区平均海拔由高到低的顺序; 就各季降水量及其配额的年代际演变位相而言, 祁连山影响区对巴丹吉林沙漠周边地区有很好的代表性。5) 巴丹吉林沙漠周边地区的降水量在近 35 年来 (1971-2005 年间) 有明显增大的趋势, 这种增大趋势主要体现于春季和冬季 (尤其是春季), 春季降水量的平均增大幅度为 +4.1mm/decade; 海拔越高的地区, 春季和全年降水量的增幅越大, 夏季降水量的减幅越小; 全区全年降水量的增大趋势主要得益于祁连山影响区和沙漠东侧区的贡献。6) 巴丹吉林沙漠周边地区各季及全年降水量均随东亚夏季风指数的减弱而有所增大; 冬、夏二季、及全年降水量与东亚夏季风指数间的相关系数明显受地形影响: 随海拔升高, 系数越来越小, 但其绝对值越来越大; 东亚夏季风对降水量的负影响以地势较高处 (如祁连山影响区) 更为显著。7) 逆反馈机制是巴丹吉林沙漠周边地区各季沙尘暴与降水量间的主要作用方式, 地形对降水量与沙尘暴频次间的相互作用没有明显影响。

正如文中所述, 根据巴丹吉林沙漠周边各分区各季及全年降水变化在各分区内、外测站间平均相关系数的对比情况, 可以初步推测, 春、秋两季, 影响巴丹吉林沙漠及其周边地区降水的天气系统尺度一般比冬、夏两季大, 这个结论需要进一步验证。另外, 根据各季降水量配额与海拔高度间的相关系数推测, 研究区内高处湿润、并易形成地形降水的条件更有利于增多春、秋二季的降水配额, 却不利于增多夏季降水的配额, 这个推论的根本性原因有待于深入研究。

参考文献

- [1] 张强, 黄荣辉, 王胜, 西北干旱区陆—气相互作用试验(NWC2ALIEIX)及其研究进展, 地球科学进展, 2005, 20(4): 427-440.
- [2] 鲍艳, 吕世华. 干旱、半干旱地区陆气相互作用研究进展[J], 中国沙漠, 2006, 26(3), 454-460.
- [3] 黄荣辉, 陈文, 马耀明等, 中国西北干旱区陆-气相互作用及其对东亚气候变化的影响, 北京: 气象出版社, 2011:28-56,100-135,337-354.
- [4] 朱金峰, 王乃昂, 陈红宝等. 基于遥感的巴丹吉林沙漠范围与面积分析. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1087-1094.
- [5] 马宁, 王乃昂, 李卓仑等, 1960—2009年巴丹吉林沙漠南北缘气候变化分析, 干旱区研究, 2011, 28(2): 242-250.
- [6] 马宁, 王乃昂, 朱金峰等, 巴丹吉林沙漠周边地区近50a来气候变化特征, 中国沙漠, 2011, 31(6): 1541-1547.
- [7] Shilong Piao, Philippe Ciais, Yao Huang, et al.(2010), The impacts of climate change on water resources and agriculture in China, *nature*, 467(2):43-51, doi:10.1038/nature09364.
- [8] 钱正安, 宋敏红, 李万元等, 全球、中蒙干旱区及其部分地区降水分布细节[J], 高原气象, 2011, 30(1): 1-12.
- [9] 刘扬, 韦志刚, 李振朝等, 中国北方地区降水变化的分区研究, 高原气象, 2012, 31(3): 638-645.
- [10] 赵景波, 邵天杰, 侯雨乐等, 巴丹吉林沙漠高大沙山区沙层含水量与水分来源探讨, 自然资源学报, 2011, 26(4): 694-702.
- [11] 刘建刚, 巴丹吉林沙漠湖泊和地下水补给机制, 水资源保护, 2010, 26(2): 18-23.
- [12] 陈建生, 赵霞, 盛雪芬等, 巴丹吉林沙漠湖泊群与沙山形成机理研究, 科学通报, 2006, 51(23): 2789-2796.
- [13] 宏伟, 王贵玲, 巴丹吉林沙漠湖泊形成的机理分析, 干旱区研究, 2007, 24(1): 1-7.
- [14] Shao Tianjie, Zhao Jingbo, Zhou Qi, et al., Recharge sources and chemical composition types of groundwater and lake in the Badain Jaran Desert, Northwestern China, *J. Geogr. Sci.* 2012, 22(3): 479-496.
- [15] 郭永海, 王海龙, 董建楠等, 关于巴丹吉林沙漠湖泊形成机制的初步看法, 中国地质大学学报(地球科学), 2012, 37(2): 276-282.
- [16] 赵霞, 陈建生, 相似优先比法研究巴丹吉林沙漠及周边地区地下水补给, 湖泊科学, 2006, 18(4): 407-413.
- [17] 张虎才, 明庆忠, 中国西北极端干旱区水文与湖泊演化及其巴丹吉林沙漠大型沙丘的形成, 地球科学进展, 2006, 21(5): 532-538.
- [18] 常兆丰, 仲生年, 韩福贵, 降水在沙丘中的渗透过程研究, 防护林科技, 2002, 53(4): 5-8.
- [19] 常兆丰, 仲生年, 韩富贵, 民勤沙漠区气候特征的分析, 防护林科技, 1999, 40(3): 15-18.
- [20] 王新平, 李新荣, 康尔泗等, 腾格里沙漠东南缘人工植被区降水入参与再分配规律研究, 生态学报, 2003.23(6): 1234-1241.
- [21] 吕刚, 吴祥云, 土壤入渗特性影响因素研究综述, 农业工程科学, 2008, 24(7): 494-499.
- [22] WanYuan Li, ShiHua Lü, Ye Yu, et al., On the way of impact and significance of the meteorological factor upon dust storm occurrence, *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2011, 3(2): 547-554.
- [23] 李万元, 吕世华, 董治宝等, 中国北方春季沙尘暴频次的多要素线性拟合, 高原气象, 2010, 29(5): 1302-1313.
- [24] Zveryaev, I. I., and R. P. Allan (2010), Summertime precipitation variability over Europe and its links to atmospheric dynamics and evaporation, *J. Geophys. Res.*, 115, D12102, doi:10.1029/2008JD011213.
- [25] Qiang Zhang, Xu Chongyu, Chen Xiaohong, et al.(2011), Statistical behaviours of precipitation regimes in China and their links with atmospheric circulation 1960–2005, *Int. J. Climatol*, 31: 1665–1678, DOI: 10.1002/joc.2193.
- [26] Kevin E. Trenberth (2011), Changes in precipitation with climate change, *CLIMATE RESEARCH*, Vol. 47: 123–138, doi: 10.3354/cr00953.
- [27] Wang, Y., and L. Zhou (2005), Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961–2001 and the associated changes in large-scale circulation, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L09707, doi:10.1029/2005GL022574.
- [28] 李万元, 吕世华, 董治宝等, 中蒙干旱半干旱区降水异常的区域性差异及其年代际演变特征, 地球科学前沿, 2012, 2:13-20.
- [29] Wang, B., Z. Wu, J. Li, J. Liu, C.-P. Chang, Y. Ding, and G. Wu, 2008: How to measure the strength of the East Asian summer monsoon. *J. Climate*, 21, 4449-4462.
- [30] Li, J. and Q. Zeng, 2005: A new monsoon index, its interannual variability and relation with monsoon precipitation. *Climatic and Environmental Research*, 10(3): 351-365.
- [31] 李万元, 董治宝, 吕世华, 近半个世纪中国北方沙尘暴的分布和变化趋势研究回顾, 2011年中国气象学会论文。

- [32] Su B.D., Jiang T., Jin W.B., Recent trends in observed temperature and precipitation extremes in the Yangtze River basin, China, *Theor. Appl. Climatol.* 2006, 83, 139–151, DOI 10.1007/s00704-005-0139-y.
- [33] Tu Kai, Yan Zhongwei, Wang Yi(2011), A Spatial Cluster Analysis of Heavy Rains in China, *ATMOSPHERIC AND OCEANIC SCIENCE LETTERS*, VOL. 4, NO. 1, 36–40.
- [34] Chang-Hoi Ho, Joo-Hong Kim, Ka-Ming Lau, et al., Interdecadal Changes in Heavy Rainfall in China during the Northern Summer, *TAO*, Vol. 16, No. 5, 1163-1176.
- [35] Wang, Y., and Z.-W. Yan, 2009: Trends in seasonal precipitation over China during 1961–2007, *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, **2**, 165–171.
- [36] 栾晨, 宋敏红, 蔡英等, 西北区西部夏半年强降水分布与变化特征, *高原气象*, 2012, 31 (3): 629-637.

表 7 巴丹吉林沙漠周边各地各月降水量与 6-8 月东亚夏季风指数的相关系数

Table 7 Correlation coefficients between each monthly precipitation at each gauge station surrounding the Badanjilin Desert and the monthly East-Asian Summer Monsoon Index from June to August

降水季节 和月份	Monsoon Index	西北缘区		祁连山影响区									民勤	沙漠东侧区					
		Ejinaqi	Guaizihu	Dingxin	Gaotai	Linze	Alashanyouqi	Zhangye	Minle	Qilian	Shandan	Yongchang		Minqin	Hailisu	Jilantai	Linhe	Alashanzuoqi	Yinchuan
冬季	12	June	0.13	0.19	-0.02	0.01	-0.21	-0.35	0.21	0.04	-0.02	0.14	0.03	0.01	0.19	-0.03	0.06	0.00	0.06
		July	-0.01	-0.10	0.38	0.15	0.27	0.22	0.20	-0.04	-0.08	0.05	-0.01	-0.04	-0.13	0.15	0.03	0.04	-0.02
		August	0.23	0.34	0.00	-0.09	-0.13	-0.13	-0.07	-0.36	0.00	0.16	0.06	0.21	0.26	0.15	0.27	0.11	0.29
	1	June	0.00	0.19	-0.09	-0.14	-0.14	-0.15	-0.15	-0.28	-0.28	-0.17	-0.33	0.01	0.09	0.09	0.05	-0.10	-0.12
		July	0.30	0.09	-0.01	-0.04	-0.15	-0.02	-0.07	-0.04	-0.04	-0.10	-0.22	0.03	-0.19	0.25	0.03	-0.05	0.06
		August	0.14	0.21	-0.20	0.00	0.16	-0.03	-0.11	-0.14	-0.04	0.01	0.06	0.00	-0.19	-0.08	-0.13	-0.10	-0.13
	2	June	0.02	-0.14	-0.08	-0.09	-0.15	-0.11	-0.12	-0.11	0.03	-0.03	-0.13	-0.22	-0.16	-0.22	-0.20	-0.37	0.03
		July	-0.12	-0.16	-0.20	-0.35	-0.26	-0.05	-0.37	-0.25	0.00	-0.13	-0.23	-0.19	-0.43	-0.06	-0.16	-0.15	-0.20
		August	0.00	-0.29	-0.31	-0.25	-0.40	-0.39	-0.40	-0.42	-0.17	-0.31	-0.22	-0.14	-0.39	-0.04	0.09	-0.11	0.09
春季	3	June	-0.02	0.38	0.06	0.02	-0.11	0.10	-0.02	-0.07	-0.01	-0.04	-0.06	0.05	-0.10	-0.03	-0.01	0.06	-0.08
		July	-0.11	0.07	-0.10	0.10	0.05	-0.02	0.02	-0.11	0.09	0.01	-0.10	-0.16	0.03	-0.03	-0.04	-0.12	-0.20
		August	-0.08	0.27	-0.04	-0.08	-0.11	0.10	-0.11	-0.15	-0.05	-0.11	-0.08	0.11	0.10	0.16	0.16	0.10	0.11
	4	June	-0.14	-0.02	0.25	-0.03	-0.18	0.14	-0.04	-0.05	-0.01	-0.13	0.11	0.07	0.09	0.22	0.27	0.04	0.16
		July	0.13	0.01	0.27	-0.05	-0.11	-0.10	-0.03	-0.05	0.04	-0.05	-0.10	-0.09	0.36	0.17	0.05	0.09	0.19
		August	-0.15	0.09	-0.08	-0.18	-0.44	-0.07	-0.20	-0.11	-0.16	-0.20	0.14	0.04	-0.06	0.08	-0.01	-0.07	0.10
	5	June	0.08	0.13	0.10	0.11	0.27	0.17	0.19	0.20	0.09	0.13	0.16	0.12	0.13	0.02	0.04	0.09	0.13
		July	-0.10	0.03	0.06	0.07	0.18	0.06	0.16	0.03	-0.01	0.10	-0.02	0.03	-0.11	-0.12	-0.12	-0.19	-0.15
		August	0.17	0.21	0.06	-0.08	-0.07	-0.12	-0.05	0.02	-0.09	-0.08	0.02	-0.20	-0.35	-0.25	-0.17	-0.14	-0.02
夏季	6	June	0.02	-0.08	-0.15	-0.15	-0.15	-0.27	-0.21	-0.23	-0.18	-0.22	-0.16	-0.17	-0.15	-0.24	-0.14	-0.20	-0.06
		July	-0.01	-0.04	0.01	-0.17	-0.03	-0.16	-0.15	-0.29	-0.26	-0.24	-0.21	0.07	0.37	0.17	-0.04	0.00	0.17
		August	-0.04	-0.27	-0.32	-0.32	-0.41	-0.17	-0.25	-0.14	-0.23	-0.08	-0.12	-0.12	0.03	-0.18	0.01	-0.21	-0.02
	7	June	0.05	0.05	0.05	-0.24	-0.23	-0.03	-0.15	-0.26	-0.05	-0.17	-0.28	-0.13	-0.18	0.04	0.10	-0.18	0.04
		July	0.04	0.08	-0.04	0.01	0.03	0.14	0.16	0.06	0.10	0.10	0.10	-0.07	-0.08	-0.10	-0.12	-0.26	-0.13
		August	0.00	-0.07	-0.03	-0.05	-0.05	-0.03	-0.15	-0.36	-0.14	-0.12	-0.23	0.12	-0.05	0.26	0.03	0.20	0.16

	8	June	-0.05	-0.37	-0.15	-0.13	-0.17	-0.15	-0.14	-0.23	-0.26	-0.09	-0.15	-0.10	-0.20	-0.18	-0.13	-0.14	-0.10
		July	-0.08	-0.25	-0.16	-0.21	0.04	-0.34	-0.07	-0.15	-0.37	-0.20	-0.10	-0.10	-0.03	0.04	-0.12	-0.12	0.04
		August	-0.04	-0.20	-0.10	-0.08	-0.12	0.13	-0.09	-0.02	-0.15	-0.14	-0.01	0.05	-0.09	0.11	0.01	0.27	0.30
秋季	9	June	0.06	-0.07	-0.16	-0.07	-0.14	0.01	-0.02	-0.12	0.13	-0.11	-0.11	-0.04	-0.03	0.04	0.02	-0.05	-0.01
		July	0.12	-0.04	0.01	-0.04	-0.01	-0.06	-0.11	-0.17	-0.18	-0.06	-0.06	0.04	-0.30	-0.06	-0.14	-0.01	0.06
		August	-0.09	-0.11	-0.04	0.04	-0.17	-0.04	0.01	-0.01	0.02	-0.09	-0.11	-0.10	-0.15	-0.04	0.16	-0.01	0.02
	10	June	0.00	-0.06	0.01	-0.09	-0.08	-0.11	-0.06	-0.11	0.00	-0.10	0.05	0.07	-0.13	0.02	-0.16	0.10	0.07
		July	-0.01	-0.07	0.02	0.13	0.03	-0.03	0.18	0.10	-0.06	0.04	-0.02	0.08	0.01	0.11	-0.07	0.05	-0.03
		August	-0.02	-0.08	0.14	0.15	0.17	0.07	0.12	-0.10	-0.23	-0.12	0.04	-0.01	-0.41	-0.14	-0.35	-0.04	0.12
	11	June	0.15	0.03	0.04	0.15	0.17	0.10	0.16	0.07	0.00	0.20	-0.09	0.09	-0.10	0.16	0.06	0.04	0.07
		July	-0.01	-0.08	-0.04	-0.17	-0.23	-0.05	-0.16	0.16	0.27	-0.01	-0.06	-0.07	-0.18	0.06	0.01	0.29	0.26
		August	0.12	-0.08	0.19	0.25	0.27	0.13	0.16	-0.06	-0.18	0.18	-0.07	0.19	0.22	0.21	0.24	0.13	0.00

注：黄色底纹代表相关系数通过显著性水平为 0.05 的 t 检验，绿色底纹通过显著性水平为 0.1 的 t 检验，白色表示没有通过这两种显著性水平的 t 检验。

The regional differences and seasonal, yearly and decadal variations in precipitation over the surrounding areas of the Badanjara Desert

Li Wanyuan, Lv Shihua

(Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, China, 730000)

Abstract

Based upon analyses on the East-Asian Summer Monsoon Index series during 1951-2005 and the monthly precipitation and dust storm frequency series during the same period for 17 regular gauge stations surrounding the Badanjara Desert, the following conclusions have been disclosed: 1) The spatial distributions of precipitation over the surrounding areas of the Badanjara Desert are apparently affected by the topography, so that the lower-altitude regions lying closely on the Desert are occupied by the drier climate with each seasonal and annual total precipitations being all less than other regions, but the higher-altitude regions farther to the Desert have a wetter climate, especially in that the areas southwest to the Desert are affected by the Qilian Mountain, leading to their seasonal and annual precipitation larger than other areas. Due to the dramatic change in altitude, the spatial variation magnitudes in each seasonal and annual precipitations over the surrounding areas of the Desert are all up to above one order. 3) According to the correlation coefficient in the year-to-year precipitation variation, the regional relation and the similarity in landforms between one station and another, the surrounding areas of the Desert can be divided into four sub-regions, including a) the Northwestern boundary sub-region, the closest to the Desert and with the lower altitude and the extremely dry climate, b) the Southwestern nearby sub-region with satisfying soil moisture, which can also be named by the Qilian Mountain affecting sub-region due to the direct influence of the Mountain, c) the Minqin area, located near and between the Badanjara and Tenggeli Deserts, and d) the sub-region east to the Desert, away from the Desert but with the landforms very similar to the surrounding areas of the Desert. 4) For each decade during 1950-2005, the large-to-small order in each average seasonal precipitation of the above-mentioned four sub-regions is the Qilian Mountain affecting sub-region, the sub-region east to the Desert, the Minqin area, and the Northwestern boundary sub-region, in which the altitude is varying also from high to low. As to the phases of the decadal variation during 1950-2005 in each seasonal precipitation or its percentage in annual total, the Qilian Mountain affecting sub-region can best represent for the whole surrounding areas of the Desert. 5) During the 35 years of 1971-2005, the precipitation over the surrounding areas of the Desert has an apparent generally increasing tendency, which is more significant for the spring and winter precipitations, with the average spring tendency reaching +4.1mm/decade. In addition, the increasing magnitudes in the spring and annual precipitations are always larger but the reducing magnitude in the summer precipitation is always smaller in the higher-altitude areas; and the increasing tendency in the annual total precipitation for the whole surrounding areas of the Desert is mainly caused by the contribution from the Qilian Mountain affecting sub-region. 6) Each seasonal and annual total precipitations are both increasing with the weakening East-Asian Summer Monsoon Index over the surrounding areas of the Desert. Besides, the correlation coefficient between the East-Asian Summer Monsoon Index and anyone of the winter, summer and annual total precipitations is apparently affected by the topography, so that, the higher the altitude, the smaller the coefficient but the larger the absolute coefficient. The negative impact on precipitation of the East-Asian Summer Monsoon Index is more significant over higher areas such as the Qilian Mountain affecting sub-region. 7) The negative feedback on each other seems to be the major acting mechanism between each seasonal precipitation and the dust storm frequency, which is hardly affected by the topography.

Key Words: Badanjara Desert; Precipitation; Yearly and decadal variation; Topography; East-Asian Summer Monsoon Index; Dust storm