

新疆天山山区近 51 年来降水变化特征

韩雪云^{1,2}, 杨青², 姚俊强³

(1. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 2. 中国气象局

乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002; 3. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046)

摘 要:利用 1959—2009 年天山山区 11 个站点的降水量数据,通过累积距平、回归分析、EOF、Mann—Kendall(M—K)检验、最大熵谱分析等,分析了近 51 a 来天山山区降水的时空分布特征。结果表明:山区降水量呈增加趋势(降水气候倾向率为 1.134 mm/a),且以 20 世纪 90 年代和 21 世纪初前 10 a 尤为明显,增湿趋势在逐渐增大;山区年降水量的变化表现出一致性增加的趋势,降水气候倾向率具有很强的区域特点,其中天山中部和南部的变化趋势均大于西部;降水空间分布主要以山区一致型和东西反相位变化为主;在 95% 的置信概率下,山区降水分别在 1992 年、1978 年和 2006 年发生突变,3 个主分量场分别表现出 2.1、2.8、2.6、5.6 a 的周期;山区年降水和冬季降水在不同海拔高度上没有明显的一致变化,夏季降水幅度随海拔高度的增加而增大。

关键词:天山山区;降水;气候倾向率;降水突变;降水周期

中图分类号:P468.0⁺24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)02-0139-06

Spatiotemporal Distribution Characteristics of Precipitation in Tianshan Mountain of Xinjiang during the Last 51 Years

HAN Xue-yun^{1,2}, YANG Qing², YAO Jun-qiang³

(1. Institute of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi

830054, China; 2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi

830002, China; 3. College of Resources and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract:Based on the precipitation data obtained from 11 stations in Tianshan Mountain during 1959—2009, spatio-temporal distribution characteristics of precipitation were analyzed by using accumulative anomaly, regression analysis, EOF(empirical orthogonal function decomposition), Mann-Kendall(M-K)inspection, ME-SA(maximum entropy method) methods. Results showed that: the precipitation in the mountain presented upward tendency (the climate trend rate was 1.134 mm/a). The increase of precipitation was most obvious in 1990s and the first decade of 21st century, relative humidity increased gradually. The change of annual precipitation had consistency strengthened, precipitation of climate trend rate had very strong regional features, which was characterized as that central and southern of Tianshan mountain precipitation trend were greater than the west. Spatial distribution of precipitation was mainly controlled by mountainous consistent type and east-west anti-phase phenomenon. Precipitation mutations in mountainous area occurred in 1992, 1978 and 2006, the three principal parts showed as 2.1 years, 2.8 years, 2.6 years and 5.6 year in cycle, respectively, under the confidence probability of 95%. Annual Precipitation in the mountains and winter had no significant change, but precipitation increased with the rise of altitude in summer.

Key words:Tianshan Mountain; precipitation; climate trend rate; precipitation mutations; precipitation cycle

新疆地处影响我国西风带天气的上游地区,而天山山脉横贯新疆全境,是突起在新疆南北荒漠地面上一条又长又高的绿岛—山地系统^[1],是影响新疆乃至

我国中、西部地区天气气候和生态环境的重要天然屏障^[2]。同时,天山是南北疆气候的分界线,对南北疆气候的形成起到了巨大的作用^[3]。一些观测数据及

收稿日期:2012-08-22

修回日期:2012-09-26

资助项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金(200821176);全球变化国家重大科学研究计划项目课题(2010CB951001)

作者简介:韩雪云(1987—),女,新疆呼图壁人,硕士研究生,主要研究方向为极端气候变化。E-mail:hanxueyun@sohu.com

通信作者:杨青(1956—),男,新疆人,研究员,主要研究方向为气候变化与环境。E-mail:yangq@idm.cn

研究结果表明^[4-6],自 1987 年起,西北地区出现了气候转向暖湿的信号,尤以天山西部地区最为强烈。关于区域降水的研究已有很多^[7-11],但与其他地区相比,山区降水的变化要复杂得多。天山山区大气降水是新疆河川径流的最终来源,是新疆生态环境、社会经济赖以维持和发展的命脉。另外,天山山区远离人类活动密集区,观测环境变化相对较小,其气候变化反映了全球气候背景变化的区域响应^[1],因此,对天山山区降水的研究具有极为重要的意义。袁玉江^[12-13]、吴纯渊^[14]等研究了 1959—1998 年间天山山区降水的变化特征,并对同期南北疆进行了对比分析。袁晴雪和魏文寿^[15]在研究天山山区近 40 a 气候变化中分析了降水的变化特征、变化阶段和周期。蓝永超等^[16]研究了天山山区 50 a 来水循环要素的变化及趋势,认为 1980 年以来山区降水呈明显上升趋势,天山南坡西段是近 10 a 降水增幅最大的区域。普宗朝等^[17]指出 1971—2006 年的 36 a 来天山山区气候呈较明显的暖湿化变化趋势,降水在 1986 年发生突变性的增大。王劲松等^[18]利用树轮资料研究了天山东段近 200 a 的干湿变化。魏文寿等^[19]利用树轮重建了天山山区近 235 a 气候变化的年降水序列。这些研究对天山山区的降水进行了有益的尝试,对后续工作有非常重大的指导意义。

作为气候过渡带的天山山区,是我国西北干旱区最大的降水中心,被称为干旱区的“湿岛”^[2],其降水对新疆的生态环境有重要影响,因此对近 51 a (1959—2009 年)天山山区降水的时空分布特征进行研究,对研究天山气候和生态变化具有重要意义。

1 资料与方法

本文使用天山山区 $\geq 1\,500\text{ m}$ 的地区作为研究区域,基于 11 个气象站点(表 1)(其中 $\geq 1\,500\text{ m}$ 的 10 站,外加新源)1959—2009 年时间序列为 51 a 的降水量资料,以统计学方法研究山区降水气候特征,通过累积距平、回归分析、经验正交函数分解、Mann—Kendall(M—K)检验、最大熵谱分析等^[20],对近 51 a 来天山山区降水的时空分布特征进行研究。气象要素变化可以用一元线性回归方程表示:

$$x_i = a_0 + a_1 \times t$$

式中: a_1 ——回归系数,也称气候倾向率,表示气候变量的长期趋势倾向。回归系数为正时,说明随时间的增加气候变量呈上升趋势;反之亦然;回归系数的大小反映了上升或下降的速率。其计算公式为:

$$a_1 = R_{xt} \times \sigma_x / \sigma_t$$

式中: σ_x, σ_t ——气象要素 x 与时间序列的均方差;

R_{xt} ——趋势系数,可以判断气候因子在长期变化过程中的上升或下降趋势,计算公式为:

$$R_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}}$$

式中: x_i —— n 个样本数的气象要素序列($i=1,2,\dots,n$); \bar{x} ——气象要素序列 $\{x_i\}$ 的均值; \bar{t} ——气象要素时间序列; n ——时间序列的长度。

表 1 天山山区站点分布

位置	站点	经度	纬度	海拔/m
西天山	新源	83°13"	43°27"	929.1
	昭苏	81°03"	43°09"	1854.6
	小渠子	87°06"	43°34"	2161.0
	巴伦台	86°18"	42°44"	1738.3
中天山	大西沟	86°50"	43°06"	3543.8
	天池	88°07"	43°53"	1935.2
	巴音布鲁克	84°08"	43°02"	2458.9
南天山	吐尔尕特	75°24"	40°31"	3507.2
	阿合奇	78°27"	40°56"	1986.0
东天山	巴里坤	93°01"	43°36"	1650.9
	伊吾	94°42"	43°16"	1729.5

2 结果与分析

2.1 降水的年代际变化

天山山区 1959—2009 年的年降水量平均值为 348.8 mm,其中年降水量最多为 466.3 mm(1998 年),最少为 256.9 mm(1997 年)。近 51 a 来山区降水量呈上升趋势,其降水气候倾向率为 1.134 mm/a。为揭示天山降水年代际变化,对 51 a 降水量做累积距平处理(图 1)发现,1959—1986 年天山降水量以减少为主,1986 年累积距平最小,1987—1997 年降水没有明显的增加或减少趋势,从 1998 年开始降水量逐步增多。此外,20 世纪 90 年代和 21 世纪初前 10 a 是降水最多的年代,其年均降水分别偏多 5%和 8.5%,表明研究区的增湿趋势在逐渐增大(表 2)。



图 1 天山山区年降水累积距平

表 2 天山山区年降水量年代际变化

年代	降水总量/mm	降水距平百分率/%	年代	降水总量/mm	降水距平百分率/%
1960—1969	327.31	−5.6	1990—1999	3641.78	5.0
1970—1979	3269.99	−5.7	2000—2009	3764.52	8.5
1980—1989	3392.35	−2.2			

2.2 降水变化趋势

天山山区年降水量在 1986 年后基本小幅波动,1998 年后稳定增加,降水气候倾向率具有很强的区域特点(图 2)。天山平均降水气候倾向率为 1.135 mm/a,其中增加趋势最大的站点是中天山的大西沟,达到 2.168 mm/a;最小变化趋势为 0.25 mm/a,位于西天山伊犁河谷的昭苏。但中天山和南天山的降水气候倾向率都达到 1.26 mm/a 左右,大于西天山的 0.99 mm/a,这与施雅风等^[4-5]得出的天山西部增湿最明显的结果不同,其原因有待进一步分析。山区降水趋势的季节分布表明,降水增加主要发生在春、夏季,夏季增加最多,达到 0.333 mm/a,形成天山夏季最大雨区,这可能与夏季青藏副热带高压北移,锋区到达 40°N 的天山附近,使得高原北部的纬向环流强大有关。



图 2 天山山区降水气候倾向率分布

2.3 降水类型场的空间分布

天山山区降水受纬度位置、地形、海拔等的影响,空间分布极为复杂,局地特征明显,影响机制多样。因此,使用经验正交函数方法能较好地反映出山区的降水特点。对山区 11 个站点 51 a 标准化降水资料进行经验正交函数分解,依据解释方差碎石图拐点,选取前 3 个主分量场进行分析。表 3 给出了前 3 个主分量的方差贡献率,累积达到 68.52%。

表 3 天山山区降水前 3 个主分量的特征值和贡献率			
序号	1	2	3
特征量	4.33	2.01	1.20
方差贡献率/%	39.36	18.29	10.87
累积方差贡献率/%	39.36	57.65	68.52

表 4 给出了前 3 个主分量的空间分布。在天山山区降水第一主分量的空间分布中,11 个站点的特征值符号均为正值,表明天山山区降水的最主要空间

分布型为整个山区一致型。以新源、巴音布鲁克和天池为中心,这也是天山山区降水最集中的区域,主要原因是西风源源不断输送水汽,加之地形的抬升作用,使降水沿山脊集中分布,对应于高空环流和山区地形特点,反映出天山山区降水主要受西风环流和地形因素的影响。

在第二主分量的空间分布中,正值区主要分布在天山主体中部及其以西的区域,以巴音布鲁克为中心,有别于中天山东侧以及东天山大部区域的负值区,表明天山降水大致呈西多东少的反相位变化,反映了山区降水的东西部之间的空间局地差异。0 值线沿海拔从天山北坡蔓延到中天山东坡,对应于海拔和地形的特点,表现出地形影响降水的特征。同时,天山东部地区是东亚季风和西风环流影响最弱的过渡区,但有时二者对抗较强,可形成东西异步变化^[21-22],与山区降水的第二主分量空间分布相似。

在第三主分量的空间分布中,正值区主要分布在伊犁河谷、南天山及东天山东部部分地区,以昭苏和阿合奇为中心,包括新源、昭苏、阿合奇、吐尔尕特及伊吾。负值区以中天山大西沟为中心,包括中天山全部、东天山大部分和西天山小部。这主要与伊犁河谷的地理位置及河谷地形有关,伊犁河谷位于西风的迎风坡,降水丰富,因而有别于天山其他区域。通过以上分析可知,采用一级分量将天山山区作为一个整体来分析其降水的时空分布是合理的。按主分量的方差贡献排列,影响天山山区降水时空分布的影响因子依次是:西风环流、高山地形和东亚季风。

表 4 天山山区降水第一主分量、第二主分量和第三主分量的空间分布

	第一主分量	第二主分量	第三主分量
新源	0.38	−0.08	0.16
昭苏	0.32	0.07	0.41
小渠子	0.39	−0.25	−0.09
巴伦台	0.31	0.29	−0.40
大西沟	0.34	0.29	−0.33
天池	0.31	−0.35	−0.16
巴音布鲁克	0.18	0.47	−0.28
吐尔尕特	0.27	0.20	0.41
阿合奇	0.21	0.32	0.48
巴里坤	0.32	−0.33	−0.14
伊吾	0.19	−0.40	0.06

2.4 降水的突变与周期分析

2.4.1 天山山区降水突变分析 对天山山区降水前三个主分量的时间序列进行 Mann—Kendall (M—K)检验(图 3),来分析各主分量的变化趋势及其突变。结果表明,在第一主分量的突变检验中,1992 年

以前 UF 值基本小于 0,而 1992 年以后 UF 值恒大于 0,UF 曲线向正方向发展,且 2002 年超过 95% 信度线,表明该地区降水增加趋势十分明显,UF 和 UB 曲线在 1992 年相交,表明降水在 1992 年发生突变。在第二主分量的突变检验中,20 世纪 60 年代至 20 世纪 70 年代末期 UF 值在 0 值上下波动,变化趋势不明显;20 世纪 90 年代初期达到最低,而后持续增加,变化趋势较为明显,UF 和 UB 曲线共有 9 个交点。为验证 M—K 方法检测的突变点,对可能突变年前后不同时段做滑动 t 检验及信噪比(Yamamoto)检验结果显示,这二者均在 1978 年出现突变,超过了 0.05 显著性水平。在第三主分量的突变检验中,20 世纪至 21 世纪头 10 a 中期 UF 值基本小于 0,UF 曲线波动变化,UF 和 UB 曲线在 2006 年相交,表明降

水在 2006 年发生突变。综上可见,天山山区 51 a 降水主要在 1992 年、1978 年和 2006 年发生突变;其中 1992 年是最主要突变点,影响着整个山区的降水;1978 年主要在天山中部发生突变;2006 年的突变主要影响天山西部的伊犁河谷地区。

2.4.2 天山山区降水周期分析 为进一步了解天山山区降水的周期变化特征,分别对前三个主分量的时间序列进行最大熵谱分析,计算各个主分量的周期。结果表明:第一主分量的周期为 2.1 a,第二主分量的周期为 2.8 a,第三主分量的周期为 2.6 a 和 5.6 a (图 4)。由此可见,准 2 a 振荡是其基本周期,影响着整个山区降水;前三个主分量都有 2~2.8 a 周期,这种变化与 Allan 等^[23]研究指出的有关 2~2.5 a 的年际振荡在全球气候系统中最突出的结论相吻合。

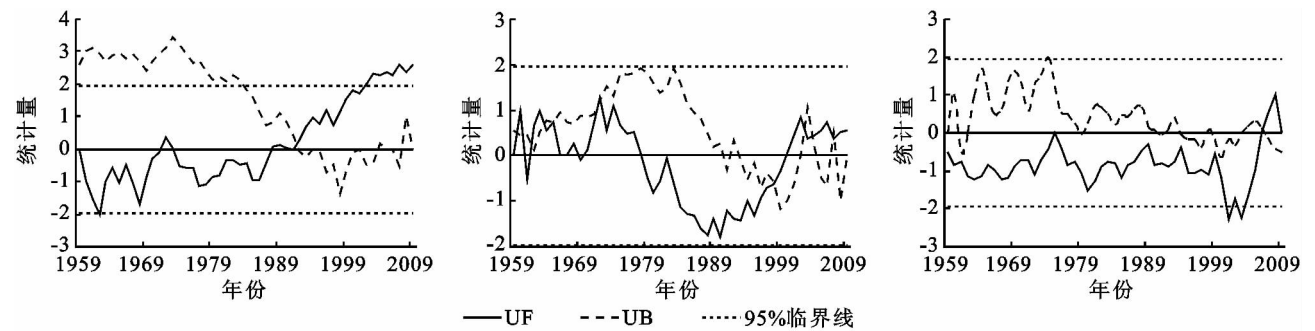


图 3 天山山区降水第一主分量、第二主分量和第三主分量的 M—K 突变检验

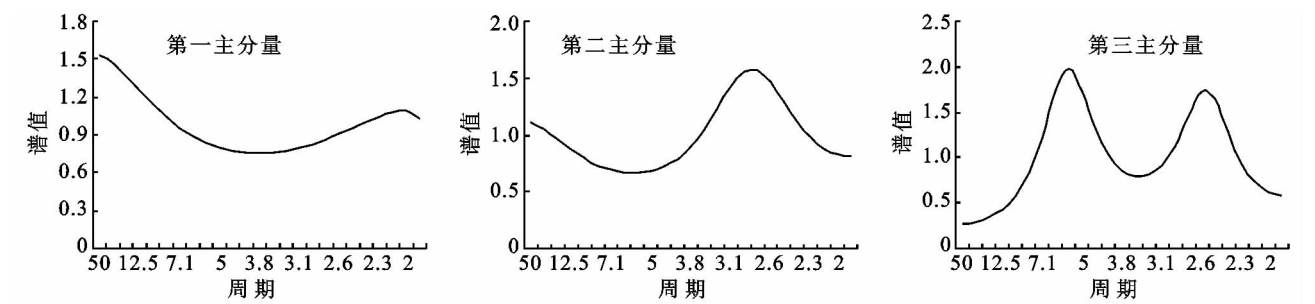


图 4 天山山区降水第一主分量、第二主分量和第三主分量的最大熵谱分析

2.5 降水的季节变化

为研究天山山区降水的季节变化,分别用 1 月、4 月、7 月、10 月来代表冬、春、夏、秋四季,对这 4 个月的降水进行经验正交分解(表 5)。1 月降水正距平区占山区大部,以天山中部为中心,仅在南部的阿合奇有一个较小的负值区域,表明 1 月降水除阿合奇外均呈现一致性变化特点。4 月份虽然与 1 月份的降水类型场基本相同,呈现北正南负的特点,但 4 月正距平中心区域明显西移。7 月份阿合奇的降水正距平区开始出现,降水正距平区蔓延整个天山,出现了两个中心,分别为天山中部和新源附近。10 月份降水全区一致,但中天山的降水中心消失,西天山成为唯一的中心,这表明山区降水中心随季节向西移动。

2.6 不同海拔高度处降水变化特征的差异

在我国大部分地区降水随海拔高度的递增而增加,以青藏高原最为突出。为了分析天山山区 51 a 来不同海拔高度降水的变化特征,统计了不同海拔高度年、冬季及夏季的平均雨量及增长趋势(表 6)。结果表明:天山山区年降水在不同海拔高度上没有明显的一致性,在<1 000 m 海拔高度上降水量和降水增加幅度最大,而 1 000~2 000 m 海拔高度上为降水低值区;夏季降水幅度表现为随海拔高度增加而增大的趋势,降水量在 2 000~3 000 m 高度达到最大;冬季降水在不同海拔高度上没有明显的一致性,在<1 000 m 海拔高度上降水量和降水增加幅度最大,而在>3 000 m 海拔高度上最小。

表 5 天山山区四季降水前三个主分量的空间分布

地区	春			夏			秋			冬		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
新源	0.36	0.21	−0.44	0.40	−0.02	−0.28	0.34	0.45	−0.06	0.41	0.08	−0.41
昭苏	0.36	0.10	−0.37	0.27	0.10	−0.73	0.28	0.52	0.01	0.22	0.35	−0.13
小渠子	0.44	0.01	−0.02	0.33	0.36	−0.17	0.43	−0.15	−0.15	0.46	−0.17	−0.03
巴伦台	0.35	0.20	0.28	0.35	−0.30	0.12	0.30	−0.24	−0.42	0.02	0.48	−0.03
大西沟	0.22	−0.15	0.49	0.37	−0.22	0.25	0.40	−0.12	−0.16	0.26	0.33	0.11
天池	0.42	−0.06	−0.08	0.29	0.36	0.10	0.36	−0.33	−0.20	0.44	−0.30	0.01
巴音布鲁克	0.04	−0.09	−0.33	0.28	−0.35	0.04	0.22	0.46	0.12	0.26	0.32	−0.37
吐尔尕特	0.14	0.56	0.11	0.23	−0.29	−0.09	0.13	−0.10	0.54	0.02	0.41	0.28
阿合奇	−0.03	0.60	0.33	0.29	−0.24	0.29	0.11	−0.23	0.43	0.00	0.32	0.46
巴里坤	0.30	−0.36	0.22	0.24	0.40	0.27	0.33	−0.01	0.31	0.38	−0.20	0.32
伊吾	0.29	−0.25	0.25	0.20	0.41	0.33	0.24	−0.23	0.38	0.29	−0.05	0.51

注: A1, A2, A3 分别为第一主分量, 第二主分量, 第三主分量。

表 6 1959—2009 年天山山区不同海拔高度降水及趋势统计

海拔高度/ m	站点 个数	年降水		夏季降水(7 月份)		冬季降水(1 月份)	
		平均雨量/ mm	增加趋势/ (mm · a ^{−1})	平均雨量/ mm	增加趋势/ (mm · a ^{−1})	平均雨量/ mm	增加趋势/ (mm · a ^{−1})
<1000	1	499.2	1.735	55.7	0.221	15.3	0.202
1000~2000	6	299.3	0.989	61.5	0.281	3.32	0.017
2000~3000	2	414.7	0.891	86.6	0.288	5.01	0.049
>3000	2	351.9	1.521	80.01	0.531	2.76	0.006

为考察不同海拔范围不同时段 的降水变化趋势, 选择 1992 年作为分界年, 分别计算 1959—1992 年和 1993—2009 年两个时间段的降水气候倾向率(表 7)。两个时段相比, 有 3 个海拔范围(1 000~2 000 m、2 000~3 000 m、>3 000 m)降水倾向率表现为增加, 其中 2 000~3 000 m 海拔范围降水气候倾向率增加幅度达到 2.479 mm/a。1 000 m 以下海拔范围降水气候倾向率减少, 减少幅度为−1.374 mm/a。

表 7 天山山区不同时段不同海拔范围的降水气候倾向率

海拔范围/ m	站点个 数/个	平均 海拔/m	降水气候倾向率/ (mm · a ^{−1})	
			1959—1992 年	1993—2009 年
<1000	1	929.10	0.474	−0.900
1000~2000	6	1815.75	0.405	0.678
2000~3000	2	2309.95	−1.042	1.437
>3000	2	3525.50	−0.402	0.082

3 结 论

(1) 在 1959—2009 年的 51 a 间, 天山山区降水量呈上升趋势(降水气候倾向率为 1.134 mm/a), 且以 20 世纪 90 年代和 21 世纪初头 10 a 尤为明显, 分别偏多 5%和 8.5%。

(2) 天山山区年降水量的变化表现出一致增强的趋势, 但降水气候倾向率具有很强的区域特点, 其中天山中部和南部的变化趋势均大于西部, 夏季降水增加最多。

(3) EOF 分析表明, 天山山区降水的最主要空间分布型为整个山区一致型, 其次为东西反相位变化。

(4) 突变和周期分析表明, 山区降水分别在 1992 年、1978 年和 2006 年发生突变, 其中 1992 年是最主要突变点, 影响着整个山区的降水; 1978 年主要在山区中部发生突变; 2006 年的突变影响天山西部的伊犁河谷地区。分别呈现出 2.1, 2.8, 2.6, 5.6 a 的周期变化。

(5) 山区年降水和冬季降水在不同海拔高度上没有明显的一致变化, 夏季降水幅度随海拔高度的增加而增大。1959—1992 年和 1993—2009 年两个时段相比, 2 000~3 000 m 海拔范围降水气候倾向率增加幅度最大, 1 000 m 以下海拔范围降水气候倾向率减少。

需要说明的是, 天山山区特殊的位置和高海拔, 使得降水的变化更加复杂, 降水的局地性更加明显, 而山区广大地区没有实测的气象数据, 因此对数据的分析有一定的影响, 这也是目前山区降水研究的瓶颈。

参考文献:

[1] 袁玉江, 何清, 穆桂金. 天山山区近 40 年夏季降水变化及与南北疆的比较[J]. 冰川冻土, 2003, 25(3): 331-335.
[2] 胡汝骥. 中国天山自然地理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.

- [3] 袁玉江,何清,喻树龙. 天山山区近40年年降水特征及与南、北疆的比较[J]. 气象科学, 2004, 24(2): 220-226.
- [4] 施雅风,沈永平,胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226.
- [5] 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164.
- [6] 胡汝骥,姜逢清,王亚俊,等. 新疆气候由暖干向暖湿转变的信号及影响[J]. 干旱区地理, 2002, 25(3): 194-200.
- [7] 刘德林. 郑州市近60年来降水变化特征及突变分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(5): 236-238.
- [8] 蔡道明,鄢铁平,廖炜,等. 湖北省1957—2009年降水时空变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 237-241.
- [9] 刘新平,何玉惠,赵学勇,等. 科尔沁沙地奈曼地区降水变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 156-158.
- [10] 熊亚兰,王昌全,张科利,等. 北盘江流域降雨量和径流量年际变化研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 30-34.
- [11] 姜创业,魏娜,程肖侠,等. 1961—2008年陕西省年际气温和降水区域性变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 197-200.
- [12] 袁玉江,李江风,胡汝骥,等. 用树木年轮重建天山中部近350年来的降水量[J]. 冰川冻土, 2001, 23(1): 34-40.
- [13] 袁玉江,叶玮,董光荣. 天山西部伊犁地区314年降水的重建与分析[J]. 冰川冻土, 2000, 22(2): 121-127.
- [14] 吴纯渊,袁玉江. 天山山区近40年冬季降水变化特征与南、北疆的比较[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(2): 87-90.
- [15] 袁晴雪,魏文寿. 中国天山山区近40年的年气候变化[J]. 干旱区地理, 2006, 23(1): 115-118.
- [16] 蓝永超,吴素芬,韩萍,等. 全球变暖情境下天山山区水循环要素变化的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(6): 99-104.
- [17] 普宗朝,张山清,李景林,等. 近36年新疆天山山区气候暖湿化变化及其特征分析[J]. 干旱区地理, 2008, 31(3): 409-415.
- [18] 王劲松,李金豹,陈发虎,等. 树轮宽度记录的天山东段近200a干湿变化[J]. 冰川冻土, 2007, 29(2): 209-216.
- [19] 魏文寿,袁玉江,喻树龙. 中国天山山区235年气候变化及降水趋势预测[J]. 中国沙漠, 2008, 28(5): 804-808.
- [20] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版. 北京:气象出版社, 2007.
- [21] 魏文寿,何青,刘明哲,等. 准噶尔盆地的气候变化与荒漠环境研究[J]. 中国沙漠, 2003, 23(2): 101-104.
- [22] 南庆红,杨舵,杨青. 应用EOF方法分析新疆降水变化特征[J]. 中国沙漠, 2003, 25(2): 554-559.
- [23] Allan R, Lindesay J, Parker D. El Nino Southern Oscillation and Climatic Variability[M]. Victoria: CSIRO Publishing, 1996.

(上接第138页)

- [3] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leave out[J]. Environ. Urban, 1992, 4(2): 120-130.
- [4] Wackernagel M. Ecological Footprints of Nations[EB/OL] <http://www.encycouncil.ac.cr/rio/focus/report/English/footprint/>, 1997.
- [5] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. National natural capacity accounting with the ecological footprint concept[J]. Ecological Economics, 1999, 29(3): 375-390.
- [6] Bicknell K B, Ball R J, Ross C, et al. New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy[J]. Ecological Economics, 1998, 27(2): 149-160.
- [7] 徐中民,张志强,程国栋. 甘肃省1998年生态足迹计算与分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 607-615.
- [8] 徐中民,程国栋,张志强. 生态足迹方法的理论解析[J]. 中国人口资源与环境, 2006, 16(6): 69-78.
- [9] 白钰,曾辉,魏建兵. 关于生态足迹分析若干理论与方法问题的思考[J]. 北京大学学报:自然科学版, 2008, 44(3): 493-500.
- [10] 王鹏,庄大昌. 衡阳市生态足迹分析与生态环境保护对策[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 246-248.
- [11] 翁伯琦,王义祥,黄毅斌,等. 福建省生态足迹和生态承载力的动态变化[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2153-2157.
- [12] 陈成忠,林振山. 中国人均生态足迹与生物承载力变化的EMD分析及情景预测[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5291-5299.
- [13] 彭建,吴健生,蒋依依,等. 生态足迹分析应用于区域可持续发展生态评估的缺陷[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2716-2722.
- [14] 熊德国,鲜学福,姜永东. 生态足迹理论在区域可持续发展评价中的应用及改进[J]. 地理科学进展, 2003, 22(6): 618-626.
- [15] 费良军,黄宝友,孙胜. 陕西省土地整理工程生态承载力模型[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 80-83.
- [16] 崔登攀,宁戈. 黑龙江省煤炭城市土地生态效益评价研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 114-117.
- [17] 谭波,傅瓦利. 基于生态足迹的巫山土地承载力研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 105-109.
- [18] 邢华超,陈知送,王秀茹,等. 延安市2001—2006年生态足迹分析[J]. 水土保持研究, 2009, 16(6): 143-146.