

黑河流域荒漠区降水格局及其脉动特征

刘冰*, 常学向, 李守波

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所临泽内陆河流域研究站; 内陆河流域生态水文重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 利用 1967—2008 年日降水资料, 对黑河流域荒漠区降水格局及其脉动特征进行系统研究。结果表明: 年均降水量为 113.3 mm, 年际变化 27.93%, 降水呈平稳下降趋势。小降水事件 (≤ 5 mm) 为主, 年际变化较小。大降水事件 (≥ 10 mm) 频率较低, 但年际变化及其对年降水量的贡献较大。降水日期以 ≤ 5 mm d⁻¹ 为主, ≥ 10 mm d⁻¹ 变异较大。 < 10 d 间隔期所占比率最大, 频率基本稳定 (CV = 18.29%), 而 > 10 d 间隔期变异较大 (CV = 27.21%)。年降水量与降水事件、降水期、< 10 d 间隔期以及总降水间隔期存在显著正相关性。 ≤ 5 mm 降水总量变异系数为 24.57%, 接近年降水量 (27.93%), > 10 mm 变异系数为 76.68%, 表明大降水事件在不同年份的差异是降水总量和降水格局差异的主要原因。

关键词: 荒漠区; 降水脉动; 降水事件; 降水日期; 降水间隔期

Rainfall patterns and pulse characteristics in desert regions of the Heihe River basin

LIU Bing*, CHANG Xuexiang, LI Shoubo

Linze Inland River Basin Research Station, Key Laboratory of Inland River Basin Ecohydrology, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: Rainfall data were collected to systematic study rainfall patterns and pulse characteristics from 1967 to 2008 in desert regions of the Heihe River basin. The results showed that the annual rainfall averaged 113.3 mm and the interannual variability accounted for 27.93% of the annual rainfall that were described as a downward trend. The majority of rainfall events were characteristic by ≤ 5 mm, and the interannual variability were relative small. Large rainfall events (≥ 10 mm) were infrequent but the interannual variability was wide comparatively. Rainfall date of ≤ 5 mm d⁻¹ were the most common, whereas the date of ≥ 10 mm d⁻¹ varied widely. Inter-rainfall period of < 10 d accounted for the most proportion and the variability were relative small (CV = 18.29%), whereas the variability of > 10 d were relative large (CV = 27.21%). Annual rainfall were significantly positively correlated with rainfall events, rainfall period, < 10 d inter-rainfall period and total inter-rainfall period. The variation coefficient of ≤ 5 mm were 24.57% and approached to that of annual rainfall (27.93%), whereas > 10 mm were 76.68%, which indicated that the interannual variability of large rainfall events were mainly resulted in the difference of annual rainfall and rainfall pattern.

Key Words: desert region; rainfall pulse; rainfall events; rainfall date; inter-rainfall period

在荒漠区, 降水格局是生物过程的根本驱动力^[1]。稀少的、不连续的和不可预测的脉动事件是降水脉动的基本特征, 其发生季节、持续时间、降水强度等特征参数具有较大的变异性^[2-3]。小降水事件 (< 5 mm) 是降水脉动的主体, 大降水事件所占的比例较小^[4-6]。例如, 北美草原 < 5 mm 降水占总降水事件的 70% 和总降水量的 25%, ≤ 10 mm 降水占生长季降水总量的 41%^[4-5]。黑河流域 ≤ 5 mm 降水也占总降水事件的 82%,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30771767, 40771079, 40930634)

收稿日期: 2009-09-14; **修订日期:** 2009-12-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liubing@lzb.ac.cn

<10 d降水间隔期占全年无降水期的 40.7%^[7];全球范围内各种干旱区都有类似的降水格局^[6,8-9]。

荒漠区降水在时间上的极大变异性,表明了干旱区地理分布的异质性^[10],已引起水文研究领域对自然水文与水资源系统动力驱动因子—降水的广泛研究^[11]。荒漠区小降水事件发生的频率相对较高,对年降水总量的贡献也较稳定,如巴塔哥尼亚草原 22a 间的年平均降水量为 137mm,≤5mm 降水事件及降水量年际变异相对很小,而≥10mm 年际变异性较大,变化范围 20—170mm/a^[9],这种降水特征在其它水分制约型生态系统中也有所报道^[6,12],表明不同水文年份在大降水事件上的差异是其降水总量和降水格局差异的主要原因。降水年际变化与总降水量呈逆函数关系,但研究很少关注降水量级和降水间期的分布特征^[10]。

气候变化对全球及区域范围内水循环产生重要影响^[13-14],意味着降水格局将发生很大变化,甚至年降水量、降水强度将增大和极端降水事件更加频繁^[15-16]。荒漠区降水稀少。特别在环境变化过程中,蒸发增大意味着荒漠区将经受更严酷的干旱胁迫^[13-14]。因此,荒漠区降水研究将集中在降水格局如何变化以及降水格局变化对土壤过程、动植物群落的影响动态等方面^[12]。干旱区大部分降水研究主要集中在年降水趋势的变化、月降水和极端降水事件特征分析方面^[7,17-18],但在日降水格局特征方面的研究报道还很少。因此,以黑河流域荒漠区为例,开展日降水格局变化研究,阐明干旱区降水格局及其脉动特征对全球变化的区域响应具有重要的理论意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黑河流域发源于祁连山脉,流经青海、甘肃、内蒙古,最终注入内蒙古自治区额济纳旗的居延海。流域面积 13 万 km², 流长 821 km, 介于 37°45′—42°40′N, 96°42′—102°04′E。研究区位于黑河中游的甘肃省临泽县及其北部绿洲边缘,处于荒漠、巴丹吉林沙漠和张临高绿洲的交汇处,面积 2727.29 km²,属温带大陆性荒漠气候,年均降水量为 116.8mm,且多集中在 7—9 月份,约占全年降水量的 65%。空气相对湿度 46%,年蒸发量 2390mm,年均气温 7.6℃,最高达 39.1℃,最低为 -27.3℃。以西北风为主,风沙活动强烈,年均风速为 3.2m·s⁻¹,最大风速 21 m·s⁻¹, >8 级大风日数年均均为 15d。地带性土壤均为灰棕漠土、沙壤土及沙土。地貌景观类型有流动,半流动,固定、半固定沙丘以及丘间低地。地带性植被有典型灌木及其 1 年生草本植被等。

1.2 数据测定与分析

以 1967—2008 年临泽县、祁连山北坡的野牛沟和中国科学院寒区旱区环境研究所临泽站气象站日降水观测资料为基础,对荒漠区降水格局及其脉动特征进行研究。为避免数据缺失或质量偏低,通过线性插值法修正差值过大的数据,并将降水间隔大于 24 h 的降水作为两次独立的降水过程。此外,通过 Gauss 模型拟合月降水量曲线变化(OriginPro. 8, Massachusetts, USA),利用相关分析法分析降水量与降水因子的关系及其通过线性回归法确定降水总量与年降水量关系(SPSS 13.0, Chicago, USA)。

2 结果与分析

2.1 降水量、降水事件分布及其年际变化

研究区 1967—2008 年降水资料统计表明,年均降水量为 113.3mm,降水集中在 0—5 mm 范围内,年际变化相对较小(图 1B)。其中≤5、>5—10、>10—15、>15—20、>20—25 和>25mm 降水分别占年降水量的 44.57%、27.68%、13.03%、4.76%、2.78% 和 4.96%,占年降水事件的 72.97%、18.02%、3.60%、2.70%、0.90% 和 18.74%。≥10 mm 的降水频率很低,年际变化很大,且随降水量级增大呈减小趋势(图 1A)。所以,荒漠区以小降水事件为主(≤5mm),大降水事件(≥10 mm)频率较低,但大降水事件对年降水量的贡献较大,属于典型的降水脉动特征。

月均降水量为 9.36mm,年际变化为 84.70%。降水集中在 5—9 月份,占年降水量的 63.64%。月降水量及其年际变化为正态分布,曲线符合 Gauss 模型, $R^2 = 0.95$ (图 2)。

2.2 降水期分布及其年际变化

研究区≤5 mm 降水为 40.36 d a⁻¹,变异系数 16.07%,≥10 mm 降水 2.08 d a⁻¹,变异系数 71.91%,年

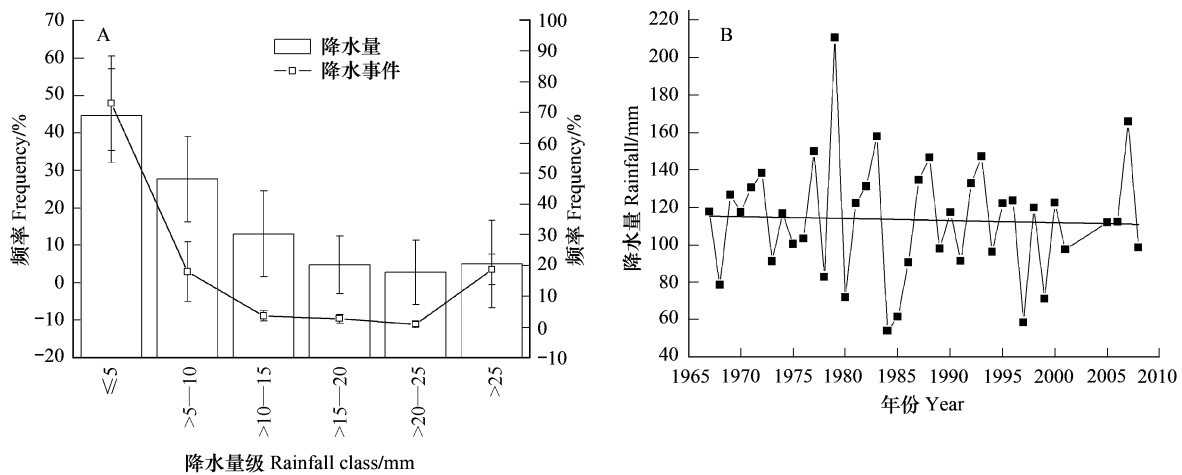


图 1 降水量、降水事件频率分布及其降水量年际变化

Fig. 1 The frequency distributing of rainfall and rainfall events, and the interannual variability

降水 46.97 d a^{-1} 。降水以 $\leq 5 \text{ mm d}^{-1}$ 的降水为主, $\geq 10 \text{ mm d}^{-1}$ 变异较大(图 3)。近年来, $\leq 5 \text{ mm d}^{-1}$ 降水小幅下降, 而 $\geq 10 \text{ mm d}^{-1}$ 呈上升趋势, 但年内总降水日期基本稳定。

2.3 降水间隔期分布及其年际变化

资料表明, $< 10 \text{ d}$ 间隔期占比率最大, 为年无降水期的 67.56% 。其中 $> 10\text{--}20 \text{ d}$ 、 $> 20\text{--}30 \text{ d}$ 、 $> 30\text{--}40 \text{ d}$ 、 $> 40 \text{ d}$ 间隔期, 分别占 13.23% 、 10.01% 、 3.84% 、 3.82% 。随间隔期增大, 不同间隔期所占比例呈下降趋势(图 4A)。 $< 10 \text{ d}$ 降水间隔期年平均为 20.67 次, $> 10 \text{ d}$ 间隔期为 9.21 次, $< 10 \text{ d}$ 降水间隔期频率基本稳定 ($\text{CV} = 18.29\%$, 图 4B), 但 $> 10 \text{ d}$ 间隔期频率明显下降且变异较大 ($\text{CV} = 27.21\%$, 图 4C)。

2.4 年降水量与降水指标关系

资料表明, 年降水量为 113.3 mm , 年际变化占 27.93% , 总体呈平稳下降趋势(图 1B, 图 5)。年降水为 35.25 次, 年际变化 13.32% 。年降水日数 46.97 d , 年际变化 15.32% 。年降水量与降水事件、降水期、 $< 10 \text{ d}$ 间隔期和总降水间隔期呈显著正相关性 ($R^2 > 0.431$, $P < 0.01$), 即年降水量随与降水事件、降水期、 $< 10 \text{ d}$ 间隔期和总降水间隔期的增加而增大(表 1)。

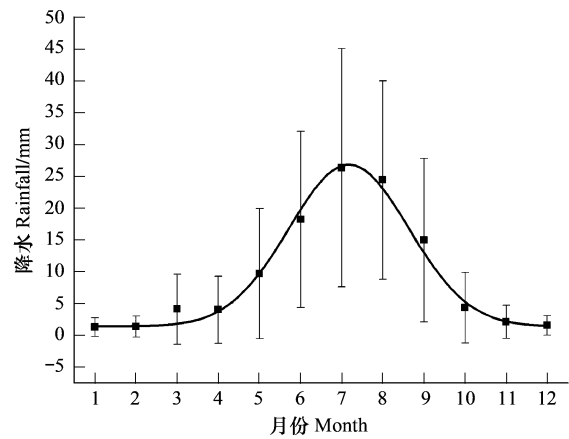


图 2 月降水量及其年际变化

Fig. 2 The monthly rainfall and the interannual variability of rainfall

表 1 降水量与降水因子的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between rainfall and rainfall factors

降水因子 Rainfall factors	降水事件 Rainfall events	降水期 Rainfall period	< 10 d 间隔期 < 10 d inter-period	> 10 d 间隔期 > 10 d inter-period	总降水间隔期 Total inter-period
降水量 Rainfall /mm	0.676 **	0.636 **	0.479 **	-0.034	0.431 **
显著性 significance	0.000	0.000	0.002	0.834	0.006

** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

荒漠区 $\leq 5 \text{ mm}$ 和 $> 10 \text{ mm}$ 降水总量与年降水量呈线性关系, 系数分别为 0.62 和 0.70 。 $\leq 5 \text{ mm}$ 降水变异系数为 24.57% , 接近年变异系数 (27.93%), 而 $> 10 \text{ mm}$ 变异系数为 76.68% (图 6), 表明不同水文年份在大降水事件上的差异是其降水总量和降水格局差异的主要原因。

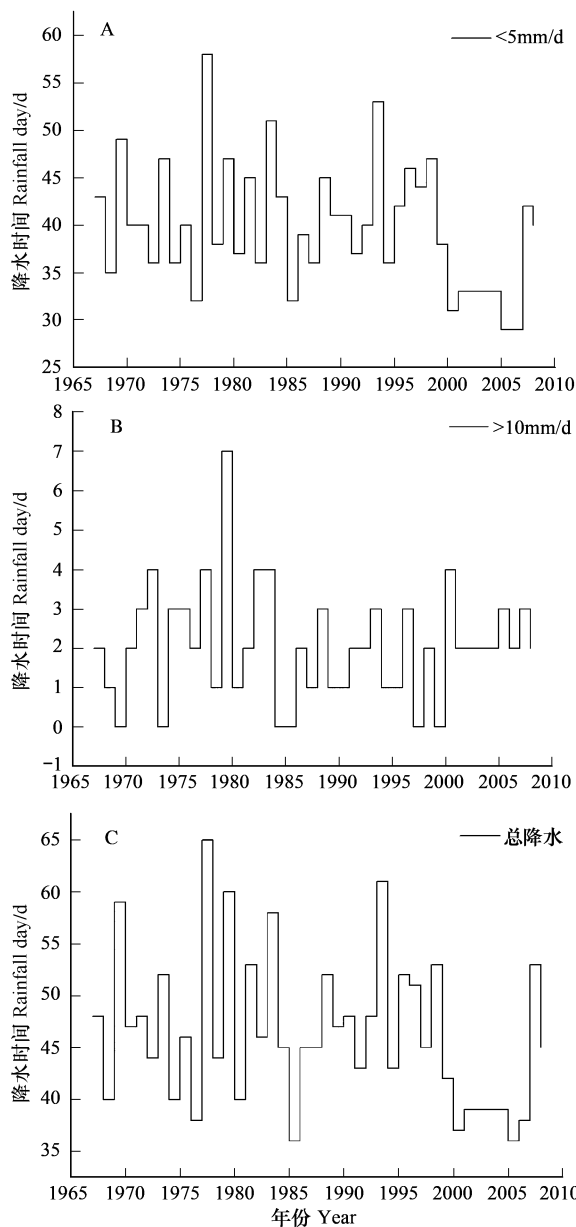


图3 降水日期及其年际变化

Fig. 3 The rainfall period and interannual variability

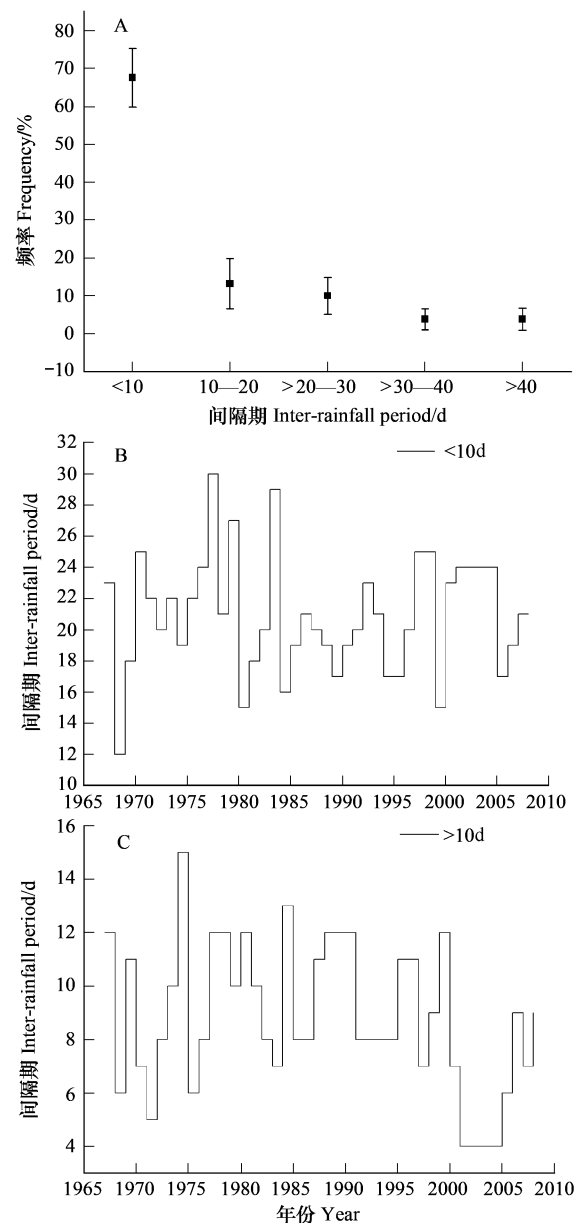


图4 降水间隔期分布及其年际变化

Fig. 4 The frequency distributing and the interannual variability of inter-rainfall period

3 讨论

在荒漠区,降水格局是重要的脉动资源^[1]。降水事件和降水量是重要的降水特征。荒漠区小降水事件更普遍^[19]。例如,在美国干旱区 ≤ 5 mm降水占年降水事件的47%, > 30 mm降水占2%—23%;在犹他州 ≤ 5 mm降水占年降水事件的64%, > 30 mm降水仅占1%^[6]。在科罗拉多州 ≤ 5 mm降水超过年降水事件的65%^[4-5], ≤ 15 d的降水间隔期超过90%^[7];然而,在美国大盆地沙漠,在夏季降水脉动间隔期较长,且大降水事件占有较大的比例^[20]。

黑河流域为我国第二大内陆河流域,属于典型的干旱区。青藏高原环流对该地区会产生影响^[21]。受其影响,在张掖地区夏季形成降水相对较少区域,加之东亚季风和祁连山地形的综合影响,结果在99—99.5°E间形成降水低值带,导致黑河流域荒漠区降水稀少的特点^[22]。研究表明黑河流域荒漠区以 ≤ 5 mm降水为主,占年降水量的44.57%和年降水事件的72.97%。多年来降水呈平稳下降趋势,这与李占玲^[23]关于甘肃

省 40a 来降水时空变化格局基本一致,但与河西走廊东部降时空特征呈相反趋势^[24]。张立杰和赵文智的研究表明黑河流域 ≤ 5 mm 降水占年降水事件的 82%, < 10 d 降水间隔期占年无降水期的 40.7%^[7],基本与本研究结果一致。近年来,黑河流域荒漠区 ≤ 5 mm 降水呈小幅下降, ≥ 10 mm 略有上升,但年内总降水日数基本稳定,这与张立杰和赵文智^[7]及 Loik 等^[6]在美国干旱半干旱区的研究结果一致。近 50a 来,中国干旱区 > 10 mm 的降水日数呈小幅下降的趋势, < 10 mm 的降水日数与总降水日数呈显著下降趋势^[25]。但是,丁永建等认为 40a 来黑河流域降水在波动中呈现出缓慢增加的趋势^[24]。因此,不同区域降水特征对全球变化具有不同的响应。

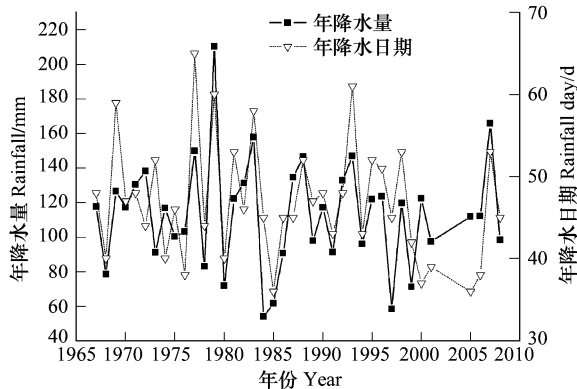


图 5 降水量和年降水日数的关系

Fig. 5 The relationship between annual rainfall and rainfall day

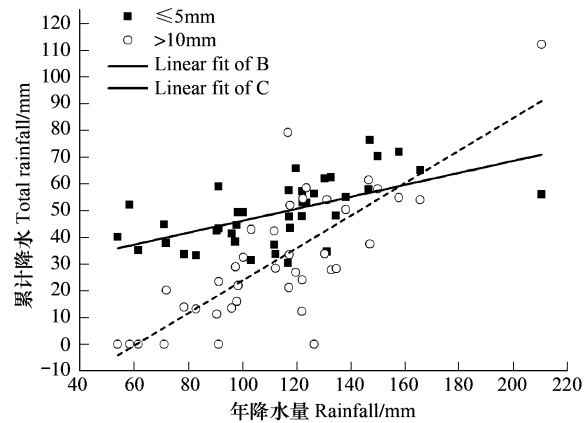


图 6 ≤ 5 mm 和 > 10 mm 降水总量和年降水量的关系

Fig. 6 The relationship between total rainfall of ≤ 5 mm and > 10 mm and annual rainfall

Bill Lauenroth 认为降水频率与降水量、降水时间及其降水间期负相关^[11]。研究区年降水量与降水事件、降水期、 < 10 d 间隔期和总降水间隔期存在显著正相关性 ($R^2 > 0.431$, $P < 0.01$), 与 Lazaro 等^[26]在西班牙东南部半干旱区的研究结果一致。 ≤ 5 mm 的降水总量随年降水的增大变化不明显,而 ≥ 10 mm 的降水总量随年降水的增大变化显著,这与 Golluscio 等^[8]在南美洲巴塔哥尼亚大草原(属于寒温带半干旱气候)研究结果极为相似,这说明降水的波动主要是由于年内降水频率及 ≥ 10 mm 的降水总量的变化引起的。此外,由于点滴式雨量筒的构造及工作原理,该装置最小读数为 0.1 mm,该刻度以下降雨无法记录在内,所测的小降水事件的降水量偏低。这部分降水在干旱区发生频率极高,上述原因使得全年降水量测定值偏低^[27]。

4 结论

利用 1967—2008 年日降水资料,对荒漠区降水格局及其脉动特征的研究表明:

(1) 荒漠区以小降水事件(≤ 5 mm)为主,大降水事件(≥ 10 mm)频率较低,且年际变化幅度很大。但是,大降水事件对年降水量的贡献较大,降水具有干旱区降水脉动特征。

(2) 年降水量随降水事件、降水期、 < 10 d 间隔期和总降水间隔期的增加而增大。 ≤ 5 mm 和 > 10 mm 降水总量的年际变化分别占 24.57% 和 76.68%,表明不同水文年份在大降水事件上的差异是其降水总量和降水格局差异的主要原因。

(3) ≤ 5 mm 降水小幅下降趋势,而 ≥ 10 mm 呈上升趋势,降水呈平稳下降趋势。降水变化较明显,但年内总降水日数基本稳定。

Reference:

- [1] Noy-Meir I. Desert ecosystems: environment and producers. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 25-52.
- [2] Weltzin J F, Tissue D T. Resource pulses in arid environments patterns of rain, patterns of life. New Phytologist, 2002, 157: 171-173.
- [3] Schwinning S, Sala O E. Hierarchy of responses to resource pulses in arid and semi-arid ecosystems. Oecologia, 2004, 141: 211-220.
- [4] Sala O E, Lauenroth W K. Small rainfall events: an ecological role in semiarid regions. Oecologia, 1982, 53(3): 301-304.

- [5] Sala O E, Lauenroth W K, Parton W J. Plant recovery following prolonged drought in a shortgrass steppe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1982, 27:49-58.
- [6] Loik M E, Breshears D D, Lauenroth W K, Belnap J. A multi-scale perspective of water pulses in dryland ecosystems: climatology and ecohydrology of the western USA. *Oecologia*, 2004, 141(2): 269-281.
- [7] Zhang L J, Zhao W Z. Daily precipitation pattern and its temporal variability in Heihe River Basin. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(4): 741-747.
- [8] Schwinning S, Davis K, Richardson L, Ehleringer J R. Deuterium enriched irrigation indicates different forms of rain use in shrub/grass species of the Colorado Plateau. *Oecologia*, 2002, 130:345-155.
- [9] Golluscio R A, Sala O E, Lauenroth W K. Differential use of large summer rainfall events by shrubs and grasses: A manipulative experiment in the Patagonian steppe. *Oecologia*, 1998, 115(1/2): 17-25.
- [10] Weltzin J F, Tissue D T. Resource pulses in arid environments patterns of rain, patterns of life. *New Phytologist*, 2002, 157: 171-173.
- [11] Martin M F. Precipitation in the desert. *Water in Desert Ecosystems*. Dowden: Hutchinson & Ross, Inc., 1981: 219-234.
- [12] Liu H, Zhao W Z, He Z B, Zhang L J. Stochastic modelling of soil moisture dynamics in a grassland of Qilian Mountain at point scale. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(12): 1844-56.
- [13] NAST. *Climate Change Impacts on the United States: The Potential Consequences of Climate Variability and Change. Overview*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000:1-17.
- [14] IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007, 996.
- [15] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, Changnon S A, Karl T R, Mearns L O. Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, 2000, 289:2068-2074.
- [16] Groisman P Y, Knight R W, Easterling D R, Karl, T R. Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate*, 2005, 18:1326-1350.
- [17] Shi X H; Zhao Y N; Dai S, Xu L, Jia H L. Research on climatic change of Qaidam Basin since 1961. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(1): 418-427.
- [18] Zhang J, Guo N, Di X H. Analysis on precipitation in winter and relation with sand days in northwest region. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(5):603-606.
- [19] Patrick L, Cable J, Potts D, Ignace D, Barron-Gafford G, Griffith A, Alpert H, Gestel Van N, Robertson T, Huxman T E, Zak J, Loik M E, Tissue D. Effects of an increase in summer precipitation on leaf, soil, and ecosystem fluxes of CO₂ and H₂O in a sotol grassland in Big Bend National Park, Texas. *Oecologia*, 2007, 151:704-718.
- [20] Loik M E. Sensitivity of water relations and photosynthesis to summer precipitation pulses for *Artemisia tridentata* and *Purshia tridentata*. *Plant Ecology*, 2007, 191: 95-108.
- [21] Tang Q C, Qu Y G, Zhou X C. *Hydrology and water resources utilization in arid regions of China*. Beijing: Science Press, 1992: 6-7.
- [22] Ding Y J, Ye B S, Zhou W J. Temporal and spatial precipitation distribution in the Heihe catchment, northwest China, during the past 40 a. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21(1): 42-48.
- [23] Li Z I, Xu Z X. Spatial and temporal analysis on annual temperature and precipitation during last 40 years in Gansu Province. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(1): 102-107.
- [24] Li L P, Li Y Y, Gai X P. Temporal-spatial distribution characteristics of precipitation event frequency and intensity in east of Hexi corridor. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(4): 254-260.
- [25] Gong D Y, Shi P J, Wang J A. Daily precipitation changes in the semi-arid region over northern China. *Journal of Arid Environments*, 2004, 59: 771-784.
- [26] Lazaro R, Rodrigo FS, Gutierrez L. Analysis of a 30 year rainfall record (1967 — 1997) in semi-arid SE Spain for implications on vegetation. *Journal of Arid Environments*, 2001, 48: 373-395.
- [27] Wei Y F, Guo K, Chen J Q. Effect of precipitation pattern on recruitment of soil water in Kubuqi desert, Northwestern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(6): 1346-1355.

参考文献:

- [7] 张立杰, 赵文智. 黑河流域日降水格局及其时间变化. *中国沙漠*, 2008, 28(4):741-747.
- [17] 时兴合, 赵燕宁, 戴升, 徐亮, 贾红莉, 张青梅. 柴达木盆地 40 多年来的气候变化研究. *中国沙漠*, 2005, 25(1):418-427.
- [18] 张杰, 郭锐, 获潇泓. 西北地区东部冬季降水与次年沙尘暴发生的关系. *中国沙漠*, 2004, 24(5):603-606.
- [21] 汤奇成, 曲耀光, 周幸超. *中国干旱区水文及水资源利用*. 北京: 科学出版社, 1992: 6-7.
- [22] 丁永建, 叶伯生, 周文娟. 黑河流域过去 40a 来降水时空分布特征. *冰川冻土*, 1999, 21(1): 42-48.
- [23] 李占玲, 徐宗学. 甘肃省 40 年来气温和降水时空变化. *应用气象学报*, 2009, 20(1): 102-107.
- [24] 李玲萍, 李岩瑛, 盖晓平. 河西走廊东部降水日数及强度的时空特征. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(4): 254-260.
- [27] 魏雅芬, 郭柯, 陈吉泉. 降雨格局对库布齐沙漠土壤水分的补充效应. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1346-1355.