

渭河上游气候因子变化特征及其与径流量的关系

蒲金涌^{1,2}, 张强³

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃兰州 730020; 2. 天水市气象局, 甘肃天水 741000; 3. 甘肃省气象局, 甘肃兰州 730020)

摘要: 根据渭河上游渭源等 12 县(区)国家基本(一般)气象站 1971—2008 年逐月气温、降水量、相对湿度、日照时数、风速等资料及北道水文站 1971—2008 年径流量资料, 采用 Mann—Kendall 法、气候倾向率等方法, 分析了气候因子变化特征及与径流量的关系。结果表明, 自 1971 年以来, 渭河上游气温以 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的倾向率上升, 气温的突变年为 1994 年。降水量呈较明显的周期变化, 突变点出现在 1994 年及 2004 年。潜在蒸散以 $23\text{ mm}/10\text{ a}$ 倾向率增加, 突变点出现在 1993 年。月径流量与降水量基本呈同步变化。年径流量以 $2.57\times 10^8\text{ m}^3/10\text{ a}$ 倾向率减少, 突变点出现在 1991 年。径流量与气温、潜在蒸散、降水量的相关性比较显著。气温升高, 潜在蒸散增加, 地表水支出增多; 潜在蒸散加大, 降水量减少, 地表水收入减少, 这是径流量减少的直接原因。

关键词: 渭河上游; 气候因子; 径流量; 关系

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)03-0095-05

中图分类号: P333.3

Variation Characteristics of Climatic Factors and Their Relationship with Runoff in Upstream of Weihe River

PU Jin-yong^{1,2}, ZHANG Qiang³

(1. Lanzhou Institute of Arid Meteorology of the China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Open Laboratory of Climate Change and Reducing Disaster of the China Meteorological Administration, Lanzhou, Gansu 730020, China; 2. Tianshui Meteorological Bureau, Tianshui, Gansu 741000, China; 3. Gansu Meteorological Bureau, Lanzhou, Gansu 730020, China)

Abstract: The potential evapotranspiration were calculated based on the data of temperature, precipitation, relative humidity, sunshine duration, and wind speed from 12 weather stations located in the upstream of the Weihe River and the data of runoff from the Beidao hydrometric station from 1971 to 2008. The characteristics of regional climate change and runoff in the upstream were discussed and their relationship was studied using the methods of Mann—Kendall and climate inclination rate. Results showed that the mean temperature had increased by $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ every ten years in the area since 1971 and the catastrophic point was in 1994. Precipitation varied with periodicity and its catastrophic points were in 1994 and 2004. The potential evapotranspiration had increased by 23 mm every ten years in the area since 1971 and catastrophe point was in 1993. This indicated that the monthly runoff varied with precipitation. The runoff had decreased by $2.57\times 10^8\text{ m}^3$ in every ten years and catastrophic point was in 1991. The runoff had significant correlations with temperature, precipitation and potential evapotranspiration and the model for simulating runoff with precipitation and potential evapotranspiration was set up. Because of the raised temperature, potential evapotranspiration increased and precipitation decreased, which caused the expenditure of surface water increased and the income of surface water decreased in the upstream. The runoff in the upstream of the Weihe River decreased in recent years. The dropping of runoff in the upstream would bring about stress for water resource safety in the downstream of the Weihe River.

Keywords: upstream of Weihe River; climatic factor; runoff; relation

收稿日期: 2012-05-10

修回日期: 2012-07-10

资助项目: 国家重点基础研究发展计划项目“气候变暖背景下我国南方旱涝灾害风险评估与对策研究”(2013CB430206)

作者简介: 蒲金涌(1960—), 男(汉族), 甘肃省天水市人, 高级工程师, 主要从事应用气象业务及气候变化研究工作。E-mail: pujinyong6@163.com。

河流径流量是地表水资源的最主要组成部分。受气候变化的影响,中国江河实测径流量变化较大。由于江河径流量形成特征不同,气候因子的变化对径流量的影响结果也不尽相同^[1]。对于长江及黄河河源区及新疆许多依靠山区固体水分融化补充的河流,温度升高是径流量增大的主要因素^[2-3],但对于黄河、长江的中下游段及大部分江河来说,温度升高引起水分蒸散量增加及降水量减少是引起径流量减少的共同因素^[4]。近年来,虽然人为因素对径流量变化有一定影响^[5-6],但气候变化仍是影响河流径流量的主导因素。

渭河是黄河第 1 大支流,发源于甘肃省渭源县西南的鸟鼠山北侧,自西向东流经甘肃、陕西两省于潼关注入黄河,全长 818 km,流域总面积 $1.35 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。多年平均天然径流量 $1.00 \times 10^{10} \text{ m}^3$,占黄河流域天然径流量的 17.3%。20 世纪 70 年代以来,以变暖为主的气候变化极大地影响了渭河上游径流量^[7-8],渭河源区的水资源环境已经出现了渐变迹象^[9],直接影响着上游水资源安全利用及其植被分布状况^[10],对下游工农业、生活用水、生态用水安全也构成一定威胁。根据上游气候因子及径流量的变化特征,对渭河上游地表水资源与气候因子的关系进行了分析探讨,以期对渭河流域水资源合理开发利用和水资源安全提供支持。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

渭河上游包括甘肃省的渭源、通渭、陇西、漳县、静宁、武山、甘谷、秦安、秦州、麦积、清水、张家川 12 个县(区)的绝大部分及岷县、临洮、安定、庄浪、会宁 5 县(区)的部分地区,流域面积为 $25\,790 \text{ km}^2$,分属陇西黄土高原和西秦岭山地。陇西黄土高原区土体疏松,植被覆盖度低于 7%,水土流失严重,多年平均侵蚀模数最高达 $8\,600 \text{ t/km}^2$,是渭河泥沙的主要来源区;西秦岭山地为土石山区,森林茂盛,水土流失较小,年侵蚀模数约 750 t/km^2 ,是渭河主要水源涵养区。流域内 80% 以上为黄土丘陵区,河谷川地面积约占 10%,海拔 $900 \sim 1\,700 \text{ m}$ 。渭河干流经甘肃渭源、陇西、武山、甘谷、麦积等 5 县(区),于凤阁岭进入陕西省,全长 430 km。

渭河上游属半干旱、半湿润气候过渡区,平均气温 $6 \sim 11 \text{ }^\circ\text{C}$,年日照时数 $2\,000 \sim 2\,420 \text{ h}$,潜在蒸散大于降水量,年平均风速 $1.3 \sim 2.9 \text{ m/s}$ 。年降水量在 $400 \sim 600 \text{ mm}$,时空分布不均,东南部多于西北部,多集中在夏、秋季。

研究所用历年逐月降水、平均气温、平均湿度、平

均气压、平均风速、平均日照时数、平均相对湿度等气象资料取自 12 个县(区)国家基本(一般)气象站 1971—2008 年测量值,并以 12 县(区)国家基本(一般)气象站的平均值作为研究的时间序列值。径流量资料取自北道水文站 1971—2008 年测量值^[11]。

1.2 研究方法

1.2.1 潜在蒸散计算方法 潜在蒸散量是指下垫面足够湿润、水体保持充分供应条件的蒸发量,是地表水分的主要支出项。已有研究成果表明,FAO 1998 年修订的 Peman—Monteith 计算模型对水分蒸散模拟比较精确^[12]:

$$E_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中: E_0 ——潜在蒸散量(mm/d); R_n ——太阳净辐射(MJ/m^2); Δ ——饱和水汽压—温度曲线斜率($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); G ——土壤热通量(MJ/m^2); γ ——湿度计常数($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); T ——日平均气温($^\circ\text{C}$); u_2 ——2 m 高处的风速(m/s); e_a ——饱和水汽压(kPa); e_d ——实际水汽压(kPa)。由于目前气象站普遍无 2 m 高处风速观测资料,风速用下式计算:

$$u_2 = 4.78 \times u_h / \ln(67.8h - 5.42) \quad (2)$$

式中: u_h —— h 处的风速(m/s); h ——距地面相对高度(m)。本研究所用风速资料由气象站测得,高度为 10.4 m,则风速 u_2 换算公式为:

$$u_2 = 0.743 \times u_{10} \quad (3)$$

式中: u_{10} ——气象站所测风速。

1.2.2 Mann—Kendall 法 Mann—Kendall 法是一种非参数统计检验方法^[13],用于检验序列的变化趋势,本文中用于检验气温、降水量、潜在蒸散及径流量的变化趋势:

$$d_i = \sum_{j=1}^k m_i \quad (2 \leq k \leq N) \quad (4)$$

式中: d_i ——统计量; m_i ——第 i 个样本 $x_i > x_j$ ($1 \leq j \leq i$) 的累计值。在原序列随机独立的假设下,对 d_k 标准化后为 $U(d_k)$,给定一显著性水平 α_0 ,当 $\alpha_1 < \alpha_0$ 时,则拒绝原假设,它表示此序列将存在一个强的增长或减少趋势。所有 (d_k) ($1 \leq k \leq N$) 将组成一条曲线 UF。把此方法引用到反序列中,得到另一条曲线 UB,如果曲线 UF 和 UB 的交叉点位于信度线之间(A, B 值),这个点便是突变的开始。

1.2.3 气候倾向率 其表示式为:

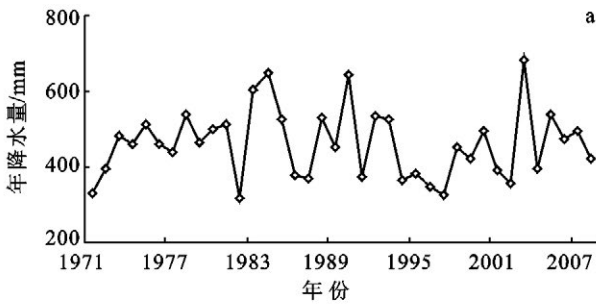
$$Y = at + b \quad (5)$$

式中: Y ——气候因子随时间的变化; t ——从变化开始算起的时间序数,本研究中为年份; b ——常数; a ——气候因子的倾向率, $a \times 10$ 即表示气候因子每 10 a 的变化趋势。

2 结果与分析

2.1 渭河上游气温变化特征

受全球气候变暖的影响,区域气温上升比较明显。渭河上游 20 世纪 70 年代气温相对较低,90 年代以后增温较快。1971—2008 年线性增温趋势为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ($R=0.4867, p<0.01$),比西北地区东部平均增温幅度偏低 $0.3/10\text{ a}$ ^[14],1994 年是增温的突变年份。1971—1994 年增温趋势较弱,线性增温趋势为 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;1994—2008 年增温趋势较强,线性增温趋势为 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。渭河上游气温与西北乃至北半球气温变化比较一致^[15]。



2.2 渭河上游降水量变化特征

渭河上游年降水量变化比较大(图 1),平均值为 461 mm(标准差 $SD=91\text{ mm}$),最小值为 317 mm(1982 年),最大值为 648 mm(1984 年),变异系数 19.5%,降水量具有比较明显的 11 和 3 a 的周期^[16]。年降水量的较大值出现在 20 世纪 80 年代初,90 年代初及 21 世纪初,突变点出现在 1994 年和 2004 年,降水量较小值出现在 20 世纪 70 年代初和 90 年代末。1971—1984 年降水量以 $118\text{ mm}/10\text{ a}$ ($R=0.2924, p<0.1$) 倾向率增加。1984—2008 年降水量呈减少趋势,但线性变化趋势不明显。这与西北地区降水变化趋势基本一致^[17]。

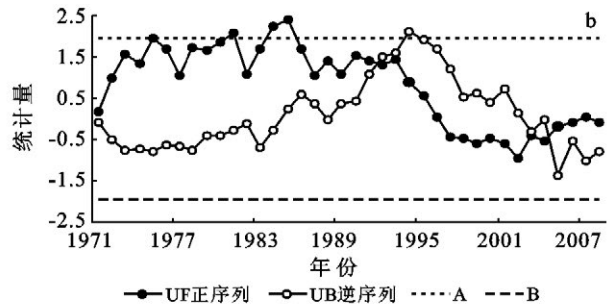


图 1 渭河上游历年降水量变化(a)及 M-K 检验曲线(b)

注:图 1b 中 A,B 为显著水平 $\alpha=0.05$ 的临界值。下同。

2.3 渭河上游潜在蒸散变化特征

年潜在蒸散量变化幅度比较小(图 2),平均值为 999 mm(标准差 $SD=46\text{ mm}$),最大值为 1 068 mm(2007 年),最小值为 921 mm(1971 年),变异系数 4.5%。随年份增加是近 40 a 潜在蒸散的主要变化特

征,1971—2008 年潜在蒸散量以 $23\text{ mm}/10\text{ a}$ ($R=0.3956, p<0.1$) 倾向率增加。潜在蒸散的突变年份出现在 1993 年,1971—1993 年潜在蒸散以 $9\text{ mm}/10\text{ a}$ 倾向率减少,1993—2008 年潜在蒸散以 $36\text{ mm}/10\text{ a}$ ($R=0.2723, p<0.1$) 倾向率增加。

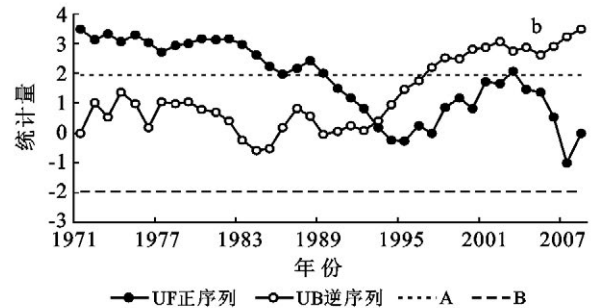
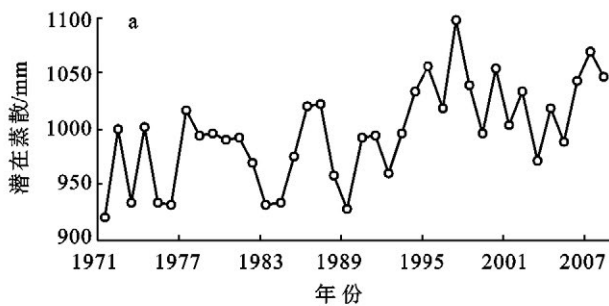


图 2 渭河上游历年潜在蒸散变化(a)及 M-K 检验曲线(b)

1971—2008 年春季潜在蒸散线性增加趋势为 $6\text{ mm}/10\text{ a}$,秋季线性增加趋势为 $34\text{ mm}/10\text{ a}$,夏、冬季潜在蒸散随年份变化不显著。

2.4 渭河上游径流量的变化特征及其与降水量、潜在蒸散量的关系

一年之中渭河上游径流量随月份呈二次曲线变化($R=0.6458, p<0.1$),较大径流量出现在 7—10

月(图 3),占全年流量的 60%左右;冬季 12 月至翌年 2 月径流量在 $4 \times 10^7\text{ m}^3$ 以下,只占全年径流量的 9%。7—10 月降水量占全年 59%,冬季降水量只占年 4%。主要降水季节(7—10 月)降水与径流量各自占全年的比例基本相同,这是因为在此时段降水过程量级较大,每次降水形成径流汇入渭河概率较大。冬季降水过程量级较小,基本上不能形成径流汇入渭

河,对渭河径流影响不大。用月降水量拟合径流量效果较好($R=0.8746, F=32.569 > F_{0.01}=4.84$):

$$Y=0.353+0.017P \quad (6)$$

式中:Y——月径流量(10^8 m^3); P——月降水量(mm)。

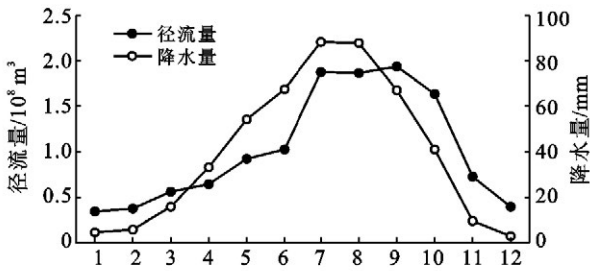


图3 渭河上游各月径流量及降水量

气温升高,蒸散增大,径流量就会减少。径流量与气温均呈较显著的负相关(表1)。降水量是上游径流量主要来源,除冬季外其余各个季节降水量与径流量均呈较显著正相关。潜在蒸散反映了地表水分的支出潜势,关系到土壤对降水量的容纳能力,是降

水量转化为径流量的决定因素。潜在蒸散大,土壤水支出多,容纳降水的空间较大,降水过程中或过程后形成的径流就少。春、夏及秋季潜在蒸散与径流量负相关比较显著。

表1 各季节气温、降水量、潜在蒸散与径流量的相关系数

气候因子	春季	夏季	秋季	冬季
气温	-0.4006*	-0.5799**	-0.3648*	-0.3770*
降水	0.3267*	0.5336**	0.4326*	-0.1217
潜在蒸散	-0.3385*	-0.5665**	-0.4238*	-0.1591

注:*表示通过0.1信度假设检验;**表示通过0.01信度假设检验。

渭河上游年径流量平均值为 $9.39 \times 10^8 \text{ m}^3$ (标准差 $SD=4.91 \times 10^8 \text{ m}^3$),最大值为 $1.91 \times 10^9 \text{ m}^3$ (1984年),最小值为 $1.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ (1997年),各年份径流量变化较大,变异系数为52%(图4)。1971—2008年径流量以 $2.57 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ ($R=0.3374, p < 0.1$)倾向率减少。近40a来渭河年径流量减少幅度较大,径流量的突变年份为1991年。

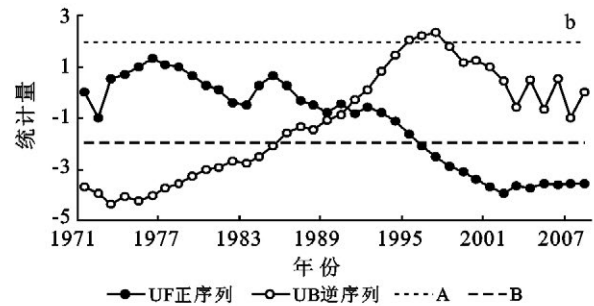
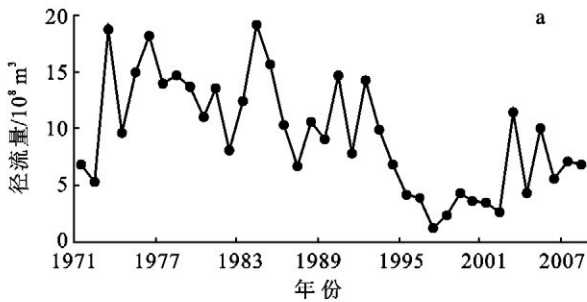


图4 渭河上游历年径流量变化(a)及M-K检验曲线(b)

气温、降水量、潜在蒸散量及径流量的突变点都不在同一年份,但其变化趋势相关性比较显著。年径流量与潜在蒸散量相关性比较显著($R=-0.6805, p < 0.01$),年径流量与降水量呈较显著正相关($R=0.6391, p < 0.01$)。年径流量与气温呈较显著的负相关关系($R=-0.6825, p < 0.01$)。用潜在蒸散及降水量来模拟年径流量($R=0.7921, F=29.516 > F_{0.01}=4.11$),历史误差值平均在8%以下,可以较好地模拟地渭河上游年径流的变化:

$$Y=55.965-0.058E+0.023W \quad (7)$$

式中:Y——年径流量(10^8 m^3); E——年潜在蒸散量(mm); W——年降水量(mm)。

依照式(7)计算,近40a潜在蒸散对径流量的影响在-30%~50%,降水量对径流量的影响在-40%~40%。

3 结论

20世纪70年代以来渭河上游地区主要气候因

子变化较大,转折点出现在1993—1994年。气温呈逐年增加趋势,突变点出现在1994年,1971—1994年增温趋势较弱,1994—2008年增温趋势较强。冬、春季增温倾向率明显,幅度较大;夏季增温倾向率不太明显,增温幅度也较小;秋季温度线性变化趋势较弱。年降水量变化的突变点出现在1994年和2004年。潜在蒸散量随年份呈较显著的增加趋势,1993年是潜在蒸散量变化的转折点。其中春、秋季蒸散量随年份线性变化比较显著,夏、冬季潜在蒸散量线性变化不显著。

一年之中,月径流量及降水量都随月份呈二次曲线变化。7—10月是径流量及降水量较大的月份,两者相关性比较显著,可以用降水量来模拟径流量的变化。1971—2008年渭河上游的年径流量呈较为显著的线性减少趋势。径流量与降水量、潜在蒸散量相关性显著,用潜在蒸散量、降水量模拟径流量的变化效果较好。年潜在蒸散可影响50%的径流量,降水量

可影响40%的径流量。径流量与气温负相关性比较显著;除冬季外,径流量与春、夏、秋季的降水量相关性比较显著;径流量还与春、夏、秋季的潜在蒸散呈较显著负相关。

近40 a来渭河上游径流量持续减少,固然与上游地区工农业生产及当地经济发展水平的快速提升有关,但气候因子对径流量影响却是不争的事实。气温升高、潜在蒸散增加,增加了水分的支出,降水量减少使得流域内水分收入减少,整个流域内水分的支多收少,必然会进一步影响上游径流量,给上、下游地区的水资源利用带来较为严重的持续影响。

[参 考 文 献]

- [1] 张建云,章四龙,王金星,等.近50 a来我国六大流域年际径流变化趋势研究[J].水科学进展,2007,18(2):230-234.
- [2] 孙卫国,程炳岩,李荣.黄河源区径流量的季节变化及其与区域气候的小波相关[J].中国沙漠,2010,30(3):712-721.
- [3] 吴素芬,刘志辉,韩萍,等.气候变化对乌鲁木齐河流域水资源的影响[J].冰川冻土,2006,28(5):703-706.
- [4] 邵爱军,左丽琼,王丽君.气候变化对河北省海河流域径流量的影响[J].地理研究,2010,29(8):604-613.
- [5] 李志,刘文兆,郑粉莉,等.黄土塬区气候变化和人类活动对径流的影响[J].生态学报,2010,30(9):2379-2386.
- [6] 江善虎,任立良,雍斌,等.气候变化和人类活动对老哈河流域径流的影响[J].水资源保护,2010,25(6):1-4.
- [7] 刘小丰,李明永,刘洪春,等.渭河陇西段河流对构造—气候变化的响应[J].干旱区资源与环境,2010,24(11):68-72.
- [8] 牛聶荣,李德生,黄维东,等.甘肃境内渭河流域水资源变化趋势预报模型研究[J].水文,2008,28(1):51-55.
- [9] 邓振镛,张强,李栋梁,等.气候变化对渭河上游径流量和输沙量的影响[J].中国沙漠,2006,26(6):982-986.
- [10] 周祖昊,仇亚琴,贾仰文,等.变化环境下渭河流域水资源演变规律分析[J].水文,2009,29(1):21-25.
- [11] 张瑞祥.渭河上游50 a来实测径流量变化特征[J].甘肃水利水电技术,2009,45(12):7-9.
- [12] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements [M]//FAO irrigation and drainage, Rome. FAO-Food and Agriculture Organization,1998,16-58.
- [13] 王清,王琪延,苏成义,等.应用数理统计学[M].北京:中国统计出版社,1991:397-401.
- [14] 秦大河,罗勇,陈振林,等.气候变化科学的最新进展:IPCC第四次评估综合报告解析[J].气候变化研究进展,2007,3(6):311-314.
- [15] 翟盘茂,邹旭恺.1951—2003年中国气温和降水变化及其对干旱的影响[J].气候变化研究进展,2005,1(1):16-18.
- [16] 李栋梁,谢金南,王蕾,等.甘肃河东地区的降水周期变化[J].高原气象,2000,19(3):295-303.
- [17] 刘芸芸,张雪琴,孙畅.全球变暖背景下西北干旱区雨季的降水时空变化[J].气候变化研究进展,2011,7(2):97-103.
- [6] 牛赞,敬文茂.祁连山北坡主要植被下土壤异质性研究[J].水土保持研究,2008,15(4):258-260.
- [7] 党宏忠,赵雨森,陈祥伟,等.祁连山青海云杉林地土壤水分特征研究[J].应用生态学报,2004,15(7):1148-1152.
- [8] 李志,刘文兆,王秋贤.黄土塬区不同地形部位和土地利用方式对土壤物理性质的影响[J].应用生态学报,2008,19(6):1303-1308.
- [9] 高雪松,邓良基,张世熔.不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J].水土保持学报,2005,19(2):53-56.
- [10] 刘世梁,傅伯杰,吕一河,等.坡面土地利用方式与景观位置对土壤质量的影响[J].生态学报,2003,23(3):414-420.
- [11] Starks P J, Heathman G C, Jackson T J, et al. Temporal stability of soil moisture profile[J]. Journal of Hydrology, 2006,324(1):400-411.
- [12] Lin H S, Kogelmann W, Walker C, et al. Soil moisture patterns in a forested catchment: a hydropedological perspective[J]. Geoderma, 2006,131(3):345-368.
- [13] Geroy I J, Gribb M M, Marshall H P, et al. Aspect influences on soil water retention and storage [J]. Hydrological Processes, 2011,25(25):3836-3842.
- [14] 高艳红,程国栋,刘伟,等.黑河流域土壤参数修正及其对大气要素模拟的影响[J].高原气象,2007,26(5):958-966.
- [15] 唐振兴,何志斌,刘鹤.黑河上游山区土壤非饱和导水率测定及其估算:以排露沟流域为例[J].生态学杂志,2011,30(1):177-182.
- [16] 舒乔生,谢立亚,贾天会,等.砂壤质褐土饱和导水率与物理性质的多尺度关系:小波分析法[J].土壤学报,2011,48(2):440-444.
- [17] 王德,傅伯杰,陈利顶,等.不同土地利用类型下土壤粒径分形分析:以黄土丘陵沟壑区为例[J].生态学报,2007,27(7):3081-3089.
- [18] 陈洪松.坡面尺度土壤特性的空间变异性[J].水土保持通报,2005,24(6):45-48.
- [19] 刘兴明,刘贤德,车宗玺,等.祁连山青海云杉林区苔藓层对流域水文的影响[J].干旱区地理,2010,33(6):962-967.

(上接第17页)