

黄土高原第Ⅲ副区小流域降水空间异质性分析

李海光^{1,2}, 余新晓², 傅恒¹, 刘奇¹, 武二喜¹

(1. 鄂尔多斯市水土保持局, 内蒙古 鄂尔多斯 017000;

2. 北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 降水的空间异质性是水资源管理重要的理论基础。以吕二沟小流域为例, 从地形地貌角度对黄土高原第Ⅲ副区小流域尺度上降水的空间异质性进行了分析, 结果发现, 多年平均降水量表现出流域上游>中游>下游的特性, 并且随着海拔的增高而增加; 不同降水强度引起的降水空间异质性不同, 降水量愈大, 空间异质性越大。应用 SURFER 软件对不同降水量情形下流域降水等值线的分布进行了模拟, 结果表明, 降水量越大, 高程和距离沟口距离所起的作用越明显。

关键词: 降水; 空间异质性; 黄土高原第Ⅲ副区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)05-0235-05

中图分类号: S715.3

Spatial Heterogeneity of Precipitation in Small Watersheds of the Third Subdivision in Hilly—gully Region of Loess Plateau

LI Hai-Guang¹, YU Xin-Xiao¹, FU Heng¹, LIU Qi¹, WU Er-xi¹

(1. Ordos Soil and Water Conservation Bureau, Ordos, Inner Mongolia 017000, China;

2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Combating Desertification of Ministry of Education, School of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Understanding of precipitation spatial heterogeneity is of great importance in water resource management. The study analyzed spatial heterogeneity of precipitation on Lü'er gully small watersheds of the third subdivision in the hilly—gully region of the loess plateau from a topographic perspective. The results indicate that the average annual precipitation decreased from on the upper to the middle and lower reaches, and increased with the altitudes. Different precipitation intensity resulted in different spatial heterogeneity of precipitation; the more the precipitation, the more the spatial heterogeneity. The equivalent curves were simulated for different precipitation events with SURFER software, which implied that the effects of elevation and distance from the channel mouth increased with the amount of precipitation.

Keywords: precipitation; spatial heterogeneity; loess plateau

全球气候变化及气候变化带来的生态环境问题越来越引起科学家和政府部门的关注^[1-2]。全球气候变化主要表现在大气 CO₂ 浓度增高, 气温升高、干旱化等^[3-5]。气候变化中降水的变化, 在我国表现为西部以及长江中下游地区降水显著增加, 北方地区降水减少^[6]。生态系统健康发展的先决条件之一是环境资源的可持续利用^[7], 因此水资源的变化成为研究气候变化的重要内容。黄土高原水资源短缺, 水土流失严重, 水分是制约黄土高原植被恢复与重建的主要限制因子, 严重影响着当地的生产生活^[8-9]。许多学者

对黄土高原的水资源进行了大量的研究, 但这些研究基本上是针对土壤水分、径流、和泥沙的^[10-13], 对降水的研究以时间序列和较大空间尺度上空间异质性变化的研究为主^[14-15], 而在流域尺度上对降水空间异质性研究较少, 尤其是关于微地形地貌对降水空间分布格局的影响的研究少见报道。

本研究以黄土高原丘陵沟壑第Ⅲ副区吕二沟小流域为研究对象, 分析流域内 6 个雨量站多年降水数据, 探求微地形地貌对降雨空间异质性的影响, 以期黄土高原生态系统恢复, 水资源合理调配和可持续

收稿日期: 2011-01-11

修回日期: 2011-01-21

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土高原多尺度耦合流域土地利用/覆被对水循环的影响及水文生态响应研究”(40871136)

作者简介: 李海光(1980—), 男(汉族), 河北省承德市人, 工程师, 博士研究生, 主要从事林业生态工程、水土保持研究。E-mail: lihaiguang4@126.com。

通信作者: 余新晓(1961—), 男(汉族), 甘肃省平凉市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为森林水文、水土保持等。E-mail: yuxinixiao111@126.com。

利用及区域水资源合理开发利用提供科学依据。

1 研究区概况

研究区设在甘肃省天水市秦州区吕二沟流域。该流域是渭河支流藉河右岸的一个南北走向的支沟,地势南高北低,呈狭长带状,流域南北长 6.94 km,东西宽 1.73 km,总面积 12.01 km²,最高海拔为 1 707 m,最低海拔 1 175 m,相对高差 532 m。共有大小支沟 51 条,沟壑密 3.82 km/km²,平均比降 7.24%。流域形状

系数 0.25^[16]。吕二沟流域是我国最早布设的小流域水土流失观测点,观测始于 1954 年。

2 研究方法

2.1 观测网站布设

选取吕二沟流域同期进行观测(1982—2008 年)的具有代表性的石家堡、胡家堡、毛家庄、柴家山、半坡寨和吕二沟沟口 6 个雨量站(见表 1,附图 10),测定其距离沟口垂直距离和海拔高程。

表 1 吕二沟流域雨量站基本情况

站名	位置	仪器形式	距沟口垂直距离/km	海拔/m
石家堡	上游山腰	普通、自记	4.85	1 511.4
胡家堡	上中游山腰	普通、自记	4.51	1 620.1
毛家庄	中游山腰	普通、自记	3.84	1 477.3
柴家山	中下游分水岭	普通、自记	2.61	1 481.2
半坡寨	下游山腰	普通、自记	1.26	1 391.3
吕二沟沟口	流域出口	普通、SL 遥测	0	1 198.7

所有雨量站均布设在空旷无障碍物的院内,由专门人员护理观测。

2.2 数据获取及处理

收集以上 6 个雨量站 1982—2008 年的降水资料,应用 SAS 9.0 软件进行数据分析,应用 ARCGIS 9.2 及 SURFER 8.0 软件进行数据图形制作。

3 结果分析

3.1 多年平均降水量空间异质性

对吕二沟流域不同雨量点近 30 a 降水量进行平均,并作海拔高度图(图 1),其变化趋势表现出明显的空间异质性。

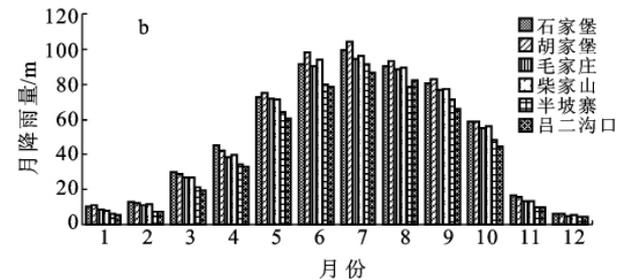
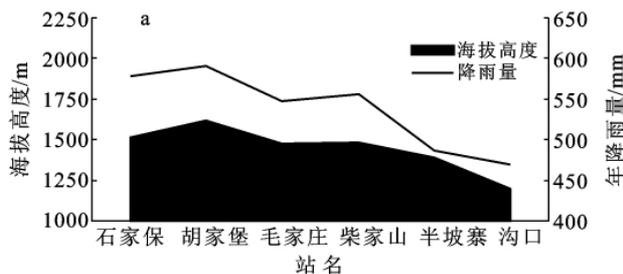


图 1 吕二沟流域多年平均年降雨量、月降雨量分布

吕二沟多年平均年降水量在不同雨量站表现出胡家堡>石家堡>柴家山>毛家庄>半坡寨>沟口的趋势,总体来说与海拔高度变化趋势基本一致,即在流域之内,越靠近流域上游,海拔越高,降水量越大。研究区海拔最高点(胡家堡)与最低点(吕二沟沟口)高差为 421.4 m,其多年平均降水量相差 121.5 mm。降水量在年内变化上呈现出 5—10 月份降水较多,其它月份较少。

海拔高度对降水量的影响是复杂的。一些研究表明,随着海拔的升高,降水量逐渐增加,但在高度达到最大之后,便开始下降,不同地区呈现不同的高度阈

值^[17]。一些学者对黄土高原的阈值进行了分析,得出其阈值为海拔 3 400 m 或相对流域高差为 1 200 m^[18]。吕二沟流域最高点海拔仅为 1 707 m,相对高差仅为 532 m,远远没有达到这个阈值,因此,吕二沟流域降水随着海拔增加而增大。出现这种现象的原因是随着海拔的增高,气温降低,更多的水汽凝结为降水,导致降水随着海拔增高而增加。

3.2 不同降水量空间异质性分析

为了分析降水量的数理统计分布特征,应用 SPSS 17.0 软件的 Q—Q 图对吕二沟流域 2 426 场降水量分布特征进行检验(图 2)。

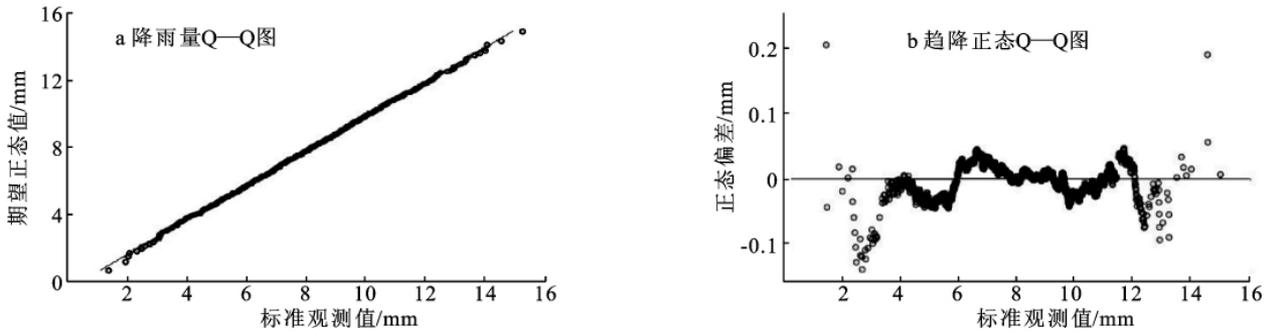


图 2 吕二沟流域场降水量分布检验

经统计检验,吕二沟流域场降水标准观测值和期望正态值之间呈现很好的直线关系,一些研究表明,越接近于这种线性关系,表明正态分布越好^[19]。对 Q—Q 图的正态趋降进行分析,正态的偏差在±0.2 之间,即吕二沟流域场降水量呈现出正态分布规律,其降水均值 $E(x)$ 为 4.75 mm,降水标准差 σ 为 4.55 mm。

为了进一步区分不同降水量在空间上的差异性,对吕二沟流域 1982—2008 年 2 426 场降水进行整理,计算降水均值 $E(x)$ 和标准差 σ 和它们之间关系,将 2 426 场降水量分为 3 种类型,分别为高降水、中降水和低降水:

$$\begin{cases} X \geq E(x) + \sigma & \text{(高降水)} \\ E(x) - \sigma < X < E(x) + \sigma & \text{(中降水)} \\ X \leq E(x) - \sigma & \text{(低降水)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: X ——实际降水量(mm); $E(x)$ ——降水量均值; σ ——降水量标准差(mm)。

计算得出高降水、中降水和低降水的阈值分别为 9.3 和 0.2 mm。据此对 2 426 场降水进行划分,分别为 ≥ 9.3 mm 的高降水 662 场,0.2~9.3 mm 的中降水 956 场, ≤ 0.2 mm 的低降水 809 场,运用 SPSS 17.0 对各雨量站之间的差异性进行统计分析(表 2)。

表 2 不同降水类型方差分析

降水类型	差异源	SS	df	MS	F	P-value	F crit
高降水	降水场次	2 795.985	662	74.632	6.780	3.10	4.103
	雨量站	416.269	5	89.333	36.443	4.18E-06	3.326
	误差	22.296	3 310	0.101			
	总计	3 234.550	3 977				
中降水	降水场次	76.244	956	1.238	4.370	2.27	4.103
	雨量站	493.206	5	5.678	27.845	1.45E-05	3.326
	误差	8.545	4 780	0.027			
	总计	134.995	5 741				
低降水	降水场次	1 159.182	809	19.635	3.884	6.47	4.103
	雨量站	491.814	5	78.553	11.517	6.83E-04	3.326
	误差	35.397	4 045	0.131			
	总计	1 688.392	4 859				

由表 2 可见,不同类型的场降水中,各雨量站均表现出显著的差异,但差异性各异。在高降水中,差异性最大($F=36.433$),在低降水中,差异性最小($F=11.517$)。高、中、低降水下其显著性均较大,说明无论何种降水类型,在空间上都表现出显著差异。但各降水强度的 F 值具有数量级的差异,说明在降水强度较强时,空间差异最大,在降水强度较低的时候,空间差异最小,即所研究区降水的空间差异性随着降水量的减小而减弱。

分别对高、中、低降水的降水量进行平均,结果见表 3。

对流域平均降水强度和差异性进行回归,可以看出降水强度与空间异质性 F 关系紧密。降水强度越大,空间异质性越大。造成这种现象的原因是在高降水情况下,降水的分布受到地形的影响较大,即水汽在空气中含量较大时,由海拔造成的气温的变化更加显著地影响水汽凝结。

表 3 不同降水类型下各雨量站年平均降水量 mm

降水强度	石家堡	胡家堡	毛家庄	柴家山	半坡寨	沟口	平均
高降水	13.8	15.1	11.9	12.7	10.5	9.8	12.30
中降水	7.4	8.0	5.3	6.3	4.6	4.3	5.98
低降水	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.18

3.3 降水空间异质性与雨量站位置分析

吕二沟流域雨量站是根据流域的地形布设的,因此,降水的空间异质性主要是流域地形因素引起的。

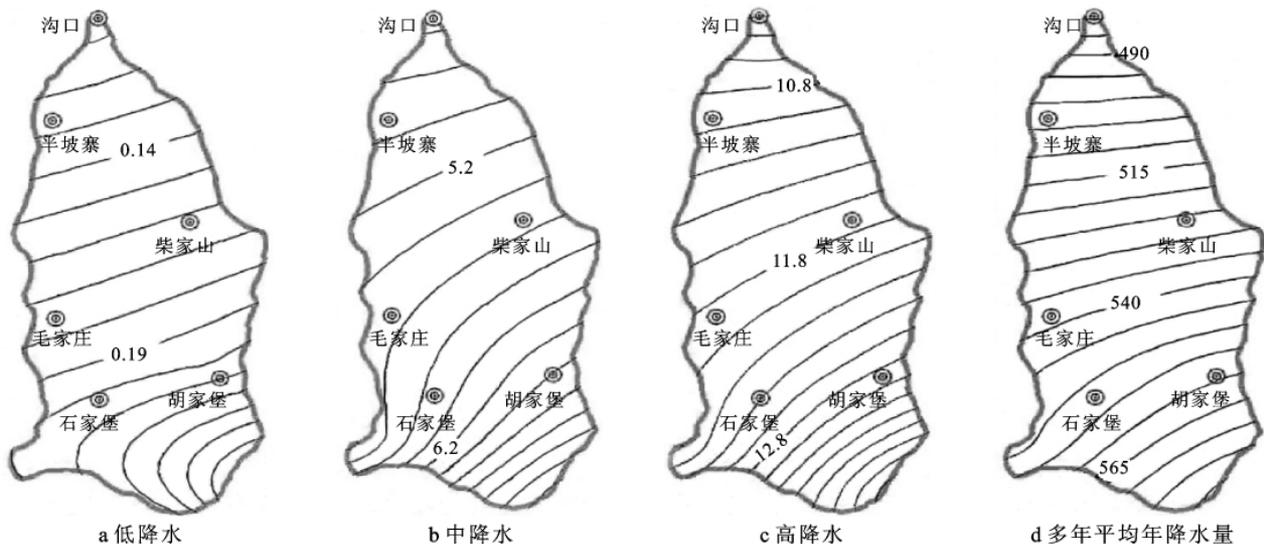


图 3 吕二沟流域不同级别降水等值线分布

由图 3 可见,从流域上游至沟口,随着海拔的降低,距离沟口的距离减小,降水量逐渐减小。减小幅度各不相同,高降水减小幅度最大,低降水减小幅度最小。多年平均年降水量从流域上游至下游减少 20.69%。对降水量(P)与海拔(H)、距沟口距离(L)进行回归,3 种类型的回归方程为:

$$\begin{aligned} \text{低降水: } P &= -0.382\ 01 + 0.000\ 375\ 17H + \\ &\quad 0.007\ 94L \quad (R^2 = 0.52) \\ \text{中降水: } P &= -2.363\ 04 + 0.005\ 12H + \\ &\quad 0.331\ 23L \quad (R^2 = 0.61) \\ \text{高降水: } P &= -1.062\ 70 + 0.008\ 53H + \\ &\quad 0.358\ 59L \quad (R^2 = 0.99) \end{aligned} \quad (2)$$

可见,降水量随海拔和距沟口距离的增加而增加。

对多年平均年降水量进行回归,方程为:

$$\bar{P} = -30.427\ 34 + 0.131\ 74H + 15.583\ 69L \quad (R^2 = 0.98) \quad (3)$$

吕二沟流域南高北低,降水集中在夏季,水汽主要来源于东南季风^[20],季风的来向和流域走向基本一致。来自南部的降水云团翻越群山到达流域上游时,饱和的大气迅速降低而在上游形成降水。随着云团向沟口的飘移,云团中的水汽含量逐渐减少,加之由海拔引起的气温升高,造成水汽凝结困难,从而降水量减少。

4 结论

本文对黄土高原丘陵沟壑第Ⅲ副区吕二沟小流

应用 SURFER 8.0 对流域的降水量和空间位置进行分析,利用克里格(Kriging)法进行空间插值,进而研究空间异质性和雨量站空间位置的关系(图 3)。

域降水的空间异质性对流域微地形地貌的响应进行了分析。

(1) 多年平均年降水量和各月平均降水量均表现出流域上游较大,下游较小的特征。

(2) 不同降水量情况下的降水空间异质性不同。降水量愈大,雨量站之间降水的空间差异性越大。

(3) 对不同降水量与海拔高程、距离沟口距离的回归分析表明,降水量越大,高程和距离沟口距离对降水再分配起到的作用越明显,即降水量的空间异质性可由流域内任何点的高程和距离沟口距离体现。

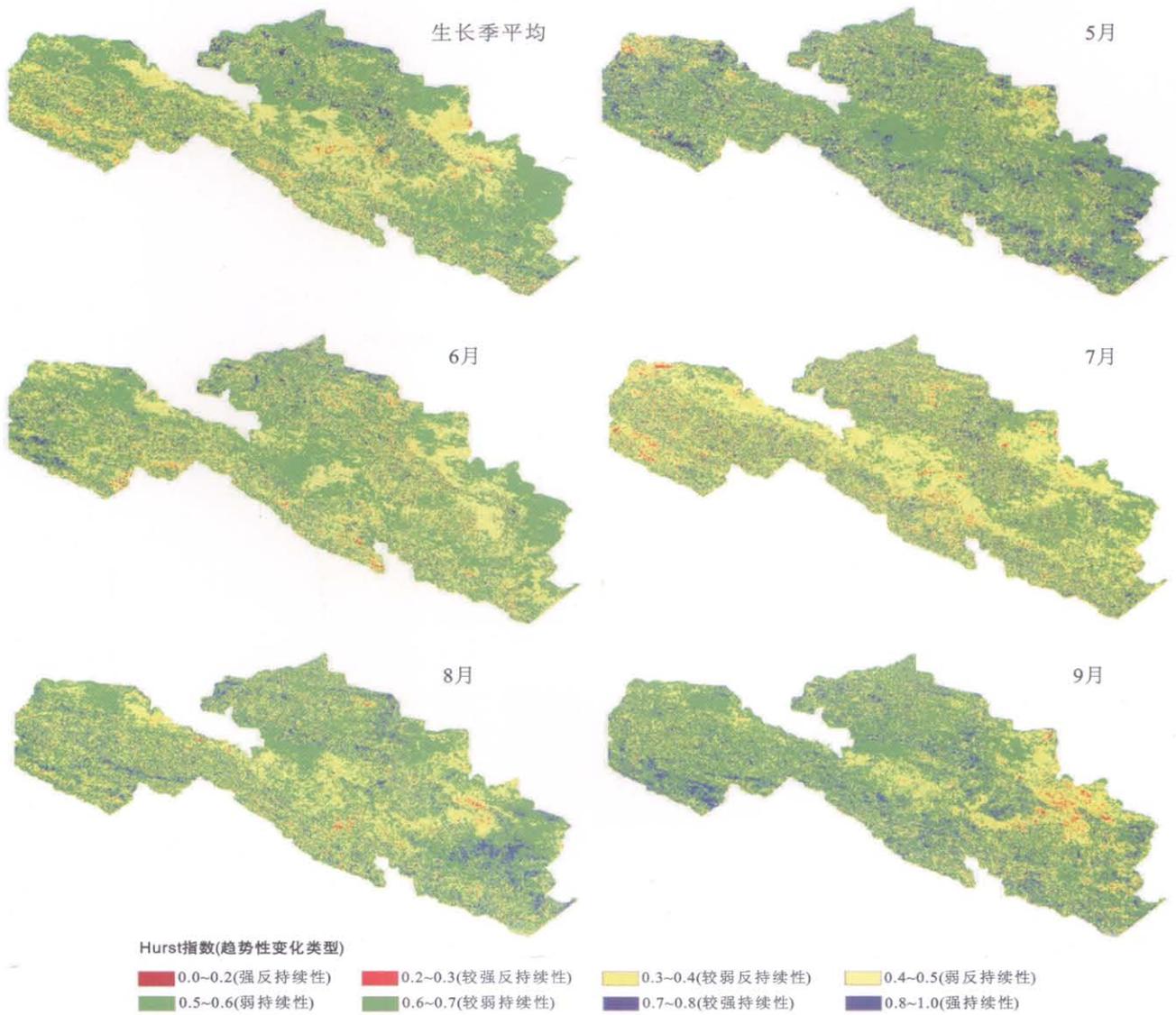
[参 考 文 献]

- [1] Hansen J, Lebedef S. Global trends of measured surface air temperature[J]. Journal of Geophysical Research, 1987,92:13345-13372.
- [2] Karl T R, Jones P D, Knight R W. A new perspective on recent global warming: A symmetrical trends of daily maximum and minimum temperature[J]. Bull. Amer. Meteor Soc., 1993,74(6):1007-1023.
- [3] 林栋,马晖玲,吕世海,等. 华北山地阳坡中生灌草群落植被光合差异性研究[J]. 甘肃农业大学学报,2009,44(2):122-125.
- [4] Cox P M, Betts R A, Jones C D, et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model[J]. Nature, 2000,408:184-187.
- [5] IPCC 2001. Climate change impacts, adaption, and vulnerability: summary for policy makers[R]. Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Cli-

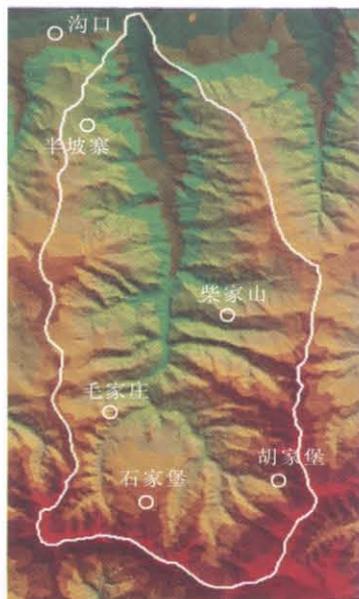
- mate Chang. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [6] Zhai P M, Ren F M, Zhang Q. Detection of trends in China's precipitation extremes[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, 57:208-216.
- [7] 张瑞君, 邱利, 黄海霞, 等. 定西市安家沟小流域生态经济系统健康定量评价[J]. *甘肃农业大学学报*, 2009, 44(1):132-137.
- [8] 孙中峰, 张学培, 张晓明, 等. 晋西黄土区林地坡面土壤水分异质性研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2004, 2:81-85.
- [9] 袁嘉祖, 闵庆文. 水是西北地区生态系统重建的根本[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(6):511-515.
- [10] 冉大川, 柳林旺, 赵力仪, 等. 黄河中游河口镇至龙门区间水土保持与水沙变化[M]. 河南 郑州:黄河水利出版社, 2000:22-27.
- [11] 杨德应, 王玲, 高贵成, 等. 陕北清涧河“2002·7”暴雨洪水分析[J]. *人民黄河*, 2002, 24(12):10-11.
- [12] 黄河水利科学研究院. 黄土高原典型支流生态环境建设的水文效应研究技术报告[R]. 河南 郑州:黄河水利科学研究院, 2005:12.
- [13] 傅伯杰, 王军, 马克明. 黄土丘陵区土地利用对土壤水分的影响[J]. *中国科学基金*, 1999, 4:225-227.
- [14] 徐宗学, 张楠. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析[J]. *地理研究*, 2006, 25(1):27-34.
- [15] 卢爱刚. 半个世纪以来黄土高原降水的时空变化[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(3):957-959.
- [16] 张晓明. 黄土高原典型流域土地利用/森林植被演变的水文生态响应与尺度转换研究[D]. 北京:北京林业大学, 2008.
- [17] 张杰, 李栋梁, 何金梅, 等. 地形对青藏高原丰枯年雨季降水量空间分布的影响[J]. *水科学进展*, 2007, 18(3):319-326.
- [18] 林之光. 地形降水气候学[M]. 北京:科学出版社, 1995:97-105.
- [19] Jammalamadaka S R, Gorla M N. A test of goodness-of-fit based on Gini's index of spacings[J]. *Statistics & Probability Letters*, 2004, 68:177-187.
- [20] Samel A N, Wang W C, Liang X Z. The monsoon rainband over China and relationships with the Eurasian circulation[J]. *Journal of Climate*, 1999, 12:115-131.

(上接第 224 页)

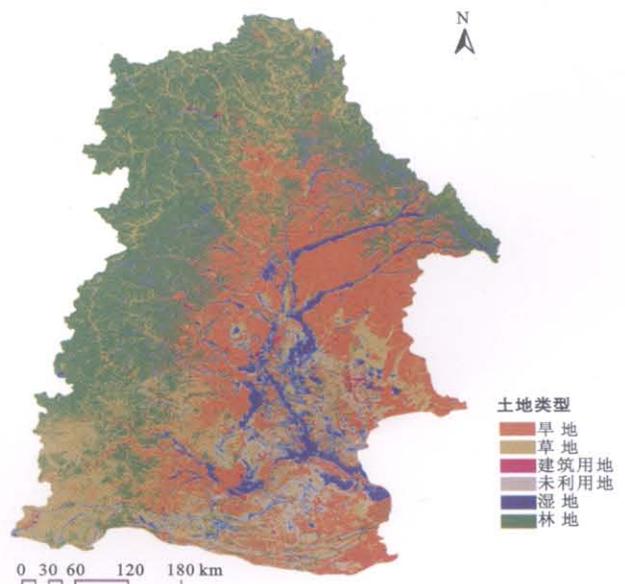
- [10] 张勃, 孟宝, 郝建秀, 等. 干旱区绿洲—荒漠带土壤水盐异质性及生态环境效应研究:以黑河中游张掖绿洲为例[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(1):81-84.
- [11] 金蓉, 石培基, 王雪平. 张掖绿洲水循环经济发展探讨[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(6):922-927.
- [12] 马荣华, 陈雯, 陈小卉, 等. 常熟市城镇用地扩张分析团[J]. *地理学报*, 2004, 59(3):418-426.
- [13] 宋开山, 张柏, 段洪涛, 等. 近 20 年吉林中东部地区林地的时空变化及成因浅析[J]. *资源科学*, 2005, 27(2):77-82.
- [14] 韩贵锋, 赵柯, 徐建华. 基于时间序列遥感的长三角地区植被时空格局演变[J]. *中国园林*, 2009(2):60-64.
- [15] 江田汉, 邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题[J]. *地理科学*, 2004, 24(2):177-182.
- [16] 殷学莲, 贺建锋. 河西走廊中部气候资源特点及其开发应用[J]. *干旱区研究*, 2010, 27(2):188-193.
- [17] 李鸣骥, 石培基. 黑河流域张掖地区近 38 年以来气候变化特征分析[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(6):1048-1054.
- [18] 王启朝, 胡录, 陈海牛. 张掖地区黑河近期综合治理工程效益初步分析[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(3):498-503.
- [19] 宋怡, 马明国. 基于 SPOT-VEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(1):89-93.
- [20] 姜晓勇, 张勃, 张遇春. 张掖地区近 35 年来气温和降水的变化[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(2):81-86.
- [21] 梁继运, 万力, 金晓媚, 等. 基于 SPOT-VEGETATION 数据的张掖盆地植被覆盖变化动态分析[J]. *科技导报*, 2009, 27(12):65-70.
- [22] 金晓媚, 万力, 李文梅. 祁连山以北地区生态植被的变化规律[J]. *科技导报*, 2007, 25(3):18-21.
- [23] 赵晶, 王乃昂. 近 50 年来兰州城市气候变化的 R/S 分析[J]. *干旱区地理*, 2002, 25(1):90-95.
- [24] 曲广周, 覃英红, 刘亮, 等. 基于 R/S 分析黄河及黄土高原主要河流水资源的变化[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(2):467-470.



附图9 2000—2008年张掖地区生长季平均值、5—9月份的Hurst指数变化趋势



附图10 甘肃省天水市秦州区吕二沟流域雨量站位置及控制面积



附图11 2005年嫩江流域土地利用分类