

辽西北玉米耗水特征及其与降水和气温的关系

曹永强,张亭亭,常 静,苏 阳,路 璐

(辽宁师范大学城市与环境学院,辽宁 大连 116029)

摘要:为分析辽西北地区玉米耗水时间变化趋势和耗水特征,利用辽西北地区 1986—2007 年的降水、气温和土壤含水量数据,基于水量平衡方程,采用 Kriging 插值法、Z 指数法及多元回归分析等方法,对辽西北地区玉米耗水特征及耗水量与降水和气温的关系进行分析。结果表明:在辽西北地区干暖化趋势的背景下,1986—2007 年玉米耗水量总体呈下降趋势;玉米耗水量等值线梯度较小,空间分布较均匀;玉米在不同旱涝等级下的耗水特征与降水量呈极显著相关关系,不同旱涝等级下耗水量从大到小排序为大涝、偏涝、正常、偏旱、大旱;降水和气温的变化对作物耗水量均有影响,其中积温对作物耗水量的影响较小,而降水量与耗水量呈明显正相关关系。

关键词:作物耗水量;水量平衡;玉米耗水特征;回归分析;辽西北地区

中图分类号:S513;S612.5⁺3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)03-0007-05

Water consumption characteristics of corn in northwestern Liaoning and its relationship with precipitation and temperature//CAO Yongqiang, ZHANG Tingting, CHANG Jing, SU Yang, LU Lu(*School of Urban and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China*)

Abstract: The temporal changing trends of water consumption of corn and its water consumption characteristics in northwestern Liaoning are investigated in this study. Based on the water balance equation, the Kriging interpolation method, Z-index and multivariate regression analysis have been employed in analyzing the water consumption characteristics of corn in northwestern Liaoning and its relationship with precipitation and temperature. Analyses are performed on precipitation, temperature and soil moisture content datasets in northwestern Liaoning from 1986 to 2007. The results show that water consumption of corn is decreasing as a whole under the background of dry warming in northwestern Liaoning. The contour gradient of water consumption of corn is small, and its spatial distribution is more homogeneous. There is a significant correlation between water consumption characteristics of corn and precipitation at different drought and flood levels. The descending order of water consumption of corn at different drought and flood levels is: floods, partial waterlogging, normal, partial drought, drought. The changes in precipitation and temperature have an effect on crop water consumption, while the effect of change of temperature is relatively small. The results also show that there is a significantly positive correlation between precipitation and water consumption.

Key words: crop water consumption; water balance; water consumption characteristics of corn; regression analysis; northwestern Liaoning

近年来,随着人口的增长和经济的迅速发展,水资源短缺问题日趋严重,与人类生存密切相关的干旱问题益发突出,给农业生产、生活和社会经济造成了严重的影响^[1]。辽西北地区(以下简称辽西北)以玉米种植为主,是辽宁省农业干旱灾害多发的地区^[2],干旱缺水危机已成为该地区最难解决的水安全问题,并日益成为影响辽西北粮食安全和经济可持续发展的一个重要而紧迫的问题。气候变化对作物耗水有着深刻影响,进而影响作物的生长发育^[3]。在作物耗水量的研究方面,常见的计算方法有水量平衡法、蒸渗仪测定法、FAO Penman-Monteith 公式法、波文比-能量平衡法等。蒸渗仪测定法精度较高,但造价昂贵;波文比-能量平衡法精度较低;FAO Penman-Monteith 法计算参数较多;而水量平衡法原理清晰,适用性强,得到了广泛的应用^[3-7]。李占玲等^[4]分析了黑河流域气温和降水量的突变特征;郭亮等^[5]利用气象卫星 AVHRR 数据反演归一化植被指数,监测了蒸发蒸腾量,取得了显

近年来,随着人口的增长和经济的迅速发展,水资源短缺问题日趋严重,与人类生存密切相关的干旱问题益发突出,给农业生产、生活和社会经济造成了严重的影响^[1]。辽西北地区(以下简称辽西北)以玉米种植为主,是辽宁省农业干旱灾害多发的地区^[2],干旱缺水危机已成为该地区最难解决的水安全问题,并日益成为影响辽西北粮食安全和经济可持续发展的一个重要而紧迫的问题。气候变化对作物耗水有着深刻影响,进而影响作物的生长发育

基金项目:清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室 2012 年对外开放研究基金(sklhse-2012-A-02);辽宁省高等学校杰出青年学者成长支持计划(LJQ2012092);国家自然科学基金(51279072)

作者简介:曹永强(1972—),男,内蒙古丰镇人,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:caoyongqiang@lnnu.edu.cn

著成效;詹志民等^[6]利用 SEBS 模型和 NOAA 数据对陇西黄土高原地区的区域蒸散量及其分布特征进行讨论;庞治国等^[7]提出了基于 SEBS 方法遥感反演腾发量的计算模型,对模型中各参数的计算采用了经验、半经验公式进行反演,并推导出日蒸散量的经验模型,提高了计算精度。目前,作物耗水量在国内的研究成果很多,但在降水与气温对作物耗水特征影响方面的研究较少。赵凌玉等^[3]以北方农牧交错带内蒙古呼和浩特市武川县为例,分析了作物生育期耗水特征及气温和降水对作物耗水量的影响。本文采用水量平衡法,利用土壤、降水及气温等数据,结合 GIS 软件分析辽西北玉米耗水特征,探讨降水和气温变化对玉米耗水量的影响。

1 研究区域概况

研究区域位于北纬 39°59′~43°29′、东经 118°50′~124°26′之间,包括朝阳、阜新、锦州、葫芦岛 4 市的所有县市,以及沈阳的康平县、法库县、新民市和铁岭的昌图县。辽西北风沙干旱,雨量较少。所用资料为代表性较好且数据完整的辽西北 1986—2007 年降水数据、气温数据和土壤含水量数据^[8]。

2 分析方法

2.1 作物耗水量计算方法

作物耗水量由作物蒸腾量和棵间蒸发量构成,根据水量平衡原理,农田水量平衡方程一般可表示为

$$\Delta W = P + I + G - ET - R - D \tag{1}$$

式中: ΔW 为土壤水分在某一时段的变化量; P 为同期降水量; I 为灌溉量; G 为毛管抬升量; ET 为农田蒸散量; R 为径流量; D 为渗漏量。辽西北地下水位较低, G 和 D 可忽略不计。2007 年以前,辽西北玉米种植区灌溉设施较少,多为雨养旱农区,且山地较少, I 和 R 也可忽略不计。

玉米根系分布于 0~100 cm 土层内^[9],60 cm 以下根系相对较少,在玉米整个生育期内各土层土壤含水量变化趋势基本一致^[10],且 50 cm 以内的土壤数据连续性较好,因此可以利用 0~50 cm 的土壤含水量分析玉米的耗水特征。

辽西北玉米种植区的农田水量平衡方程可简化为

$$ET = P - \Delta W + w \tag{2}$$

式中: ΔW 为作物生育期内土壤(0~50 cm 土层)储水变化量,等于生育期末土壤储水量与生育期初土壤储水量之差^[11-12]; w 为误差项。

土壤水分储存量是指一定深度或厚度的土壤中的含水量,以单位面积水层的深度表示,计算公式为

$$V = 10RH W \tag{3}$$

式中: V 为土壤水分最大储存水量,mm; R 为土壤密度,g/cm³; H 为土层厚度,cm; W 为土壤田间持水量,%。

2.2 Kriging 插值法

Kriging 插值法^[13]应用多种变异函数模型,考虑各已知点的空间相关性,根据给未知点周围的已知点配以权重来估算未知点,即

$$y(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i y(x_i) \tag{4}$$

式中: λ_i 为权重系数,即各空间样本点在 x_i 处观测值 $y(x_i)$ 对估计值 $y(x_0)$ 的贡献程度。

Kriging 插值法不仅应用于线性空间变化关系,同时能够自动识别样本点的空间分布,如果若干个样本距离较近而且在同一方向,那么离待估点较近的点的权值较大,其他点的权值较小,从而消除由采样不均带来的误差,提高了插值精度。此外,本文仅对耗水量进行空间变化分析,不考虑“平滑效益”对分析结果的影响。

2.3 Z 指数法

假设月降水量服从 Person-Ⅲ 型分布,其概率密度分布为

$$P(X) = [\beta T(\gamma)]^{-1} [(X - \alpha)/\beta]^{\gamma-1} e^{-(X-\alpha)/\beta} \tag{5}$$

文献[14]对降水量 X 进行正态化处理,其转换公式为

$$Z = \frac{6}{C_s} \left(\frac{C_s}{2} \varphi_i + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6} \tag{6}$$

式中: C_s 为偏态系数; φ_i 为标准变量。 C_s 和 φ_i 均可由降水资料序列计算求得:

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{n\sigma^3} \quad \varphi_i = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \tag{7}$$

其中

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

依据上面计算得出的 Z 值按照表 2 划分单站旱涝等级^[15]。

表 2 以 Z 值为指标的旱涝等级

Z 值	旱涝等级
>1.645	重涝
(1.037, 1.645]	大涝
(0.842, 1.037]	偏涝
[-0.842, 0.842]	正常
[-1.037, -0.842]	偏旱
[-1.645, -1.037]	大旱
<-1.645	重旱

2.4 多元回归分析

当影响因变量的自变量是多个时,可以建立因变量 y 与各自变量 $x_j(j=1,2,\cdots,n)$ 之间的多元线性回归模型^[16-17]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_nx_n + e \quad (8)$$

式中: b_0 为回归常数; $b_k(k=1,2,\cdots,n)$ 为回归参数; e 为随机误差。

3 辽西北玉米耗水量特性分析

3.1 气象要素变化特征

根据辽西北 1986—2007 年的气候资料,绘制了辽西北气候变化特征图(图 1)。由图 1 可知,辽西北多年平均降水量为 522.5 mm,4—9 月玉米生长季多年平均降水量为 469.7 mm,玉米生长季降水量占全年降水量的 89.9%。近 40 年来,降水量呈一定的减少趋势,1986 年以来玉米生长季年均降水量下降趋势更为明显,每年减少 6.3 mm。1986—2007 年辽西北平均温度为 9.04℃,年平均升高 0.04℃,温度呈明显升高趋势;4—9 月玉米生长季多年平均活动积温为 3 453℃·d,生长季活动积温年均升高

13.57℃·d,辽西北干暖化趋势明显。在空间上,玉米生长季辽西北多年平均降水量从东向西、从南向北递减,大于或等于 10℃ 活动积温由北向南递增。

3.2 玉米耗水时空特性

为了分析辽西北玉米耗水的时间变化趋势,利用 13 个站点(九连洞、王宝庆、朝阳、团山子、胡家、章景营子、大城子、凌海、赵家甸、八家子、新民、义县、彰武)的土壤数据和降水量,求出各站点玉米的逐年耗水量,然后将每年的各站数据进行算术平均,得出辽西北玉米逐年耗水量数据,并绘制了变化特征曲线(图 2)。由图 2 可知,辽西北玉米耗水量总体呈下降趋势,并且下降速率比较大。1992 年玉米耗水量最小,为 312 mm;而 1994 年玉米耗水量最大,达 498 mm。20 世纪 80 年代,辽西北玉米耗水量下降趋势明显;90 年代为剧烈的震荡期;21 世纪以来,玉米耗水量进入相对平稳期。

利用辽西北 13 个测站的逐年耗水量求出 13 个测站的多年平均耗水量数据,再应用 Kriging 插值法将辽西北玉米耗水量值绘制成空间分布图,能更直观地观察空间分布情况,如图 3 所示。从图 3 看出,

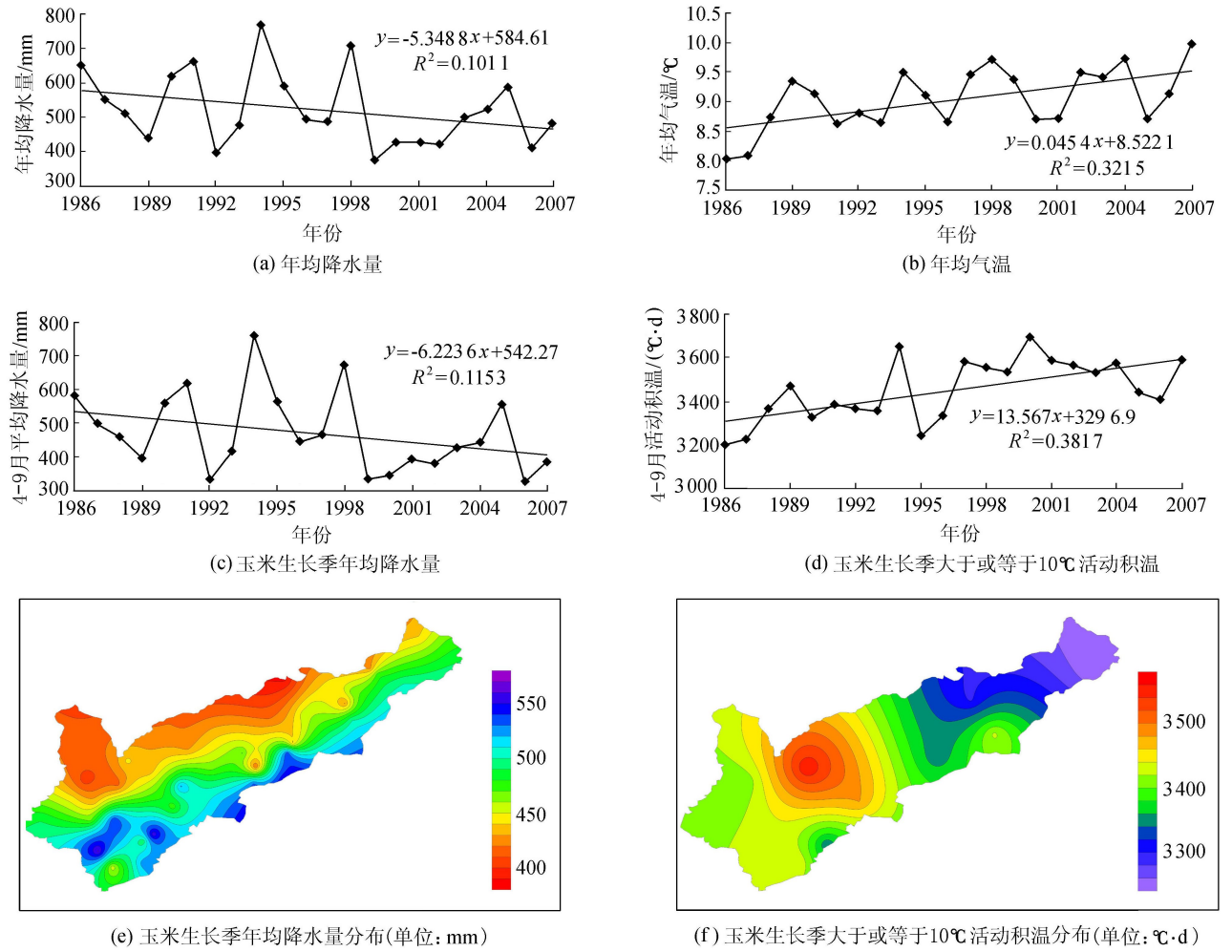


图 1 1986—2007 年辽西北气候变化特征

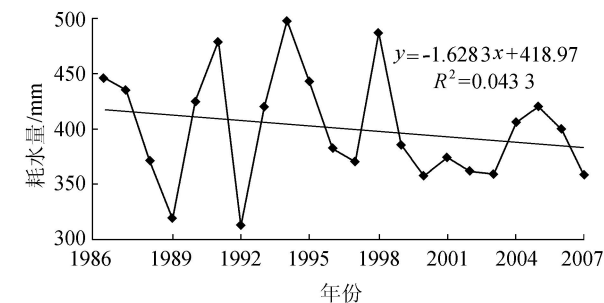


图2 辽西北玉米耗水量变化特征曲线

辽西北玉米耗水量的等值线梯度较小,空间分布比较均匀,与降水量关系明显;高值中心和低值中心的分布较为分散,玉米耗水量的高值区位于彰武县,达494 mm,其次是义县、朝阳市和黑山县等;而玉米耗水量的低值区位于新南市,为331 mm。

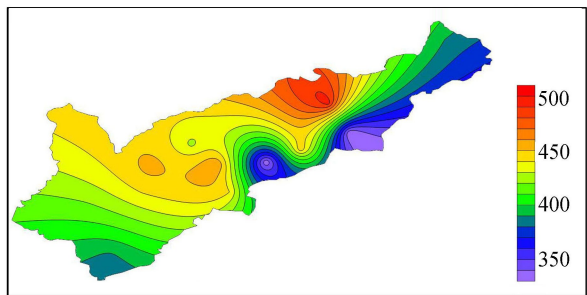


图3 辽西北玉米耗水量空间分布(单位:mm)

3.3 不同旱涝等级下的玉米耗水特征

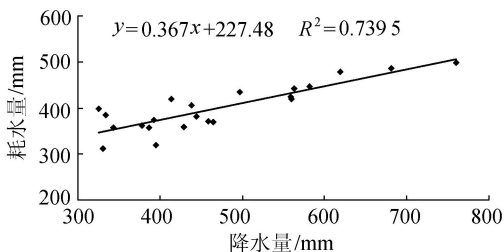
利用辽西北49个站点1986—2007年的降水量,通过计算得出相应的旱涝等级分别为大涝、偏涝、正常、偏旱和大旱5个等级。大旱发生在1999年,所占比例最小,为5%;大涝、偏涝和偏旱所占比例均为9%,1994和1998两年发生了大涝,1986和1991两年发生了偏涝,偏旱发生年份为1992年和2006年;正常年份所占比例为68%。

进一步分析辽西北玉米的耗水特征,玉米在不同旱涝等级下其耗水特征与降水量呈极显著的相关关系,不同旱涝等级下耗水量从大到小排序为大涝、偏涝、正常、偏旱、大旱。在大旱年份中,生育期耗水量大于降水量,降水量无法满足玉米的耗水需求,而其他年份降水量都能满足玉米的耗水需求,生育期降水量与耗水量基本持平,说明玉米在辽西北大田雨养农业中需水量与降水量匹配效果较好,适应性较强,能够较好地利用水分。同时,培育抗旱品种、开展抗旱栽培管理措施是今后适应气候变化的重要途径。

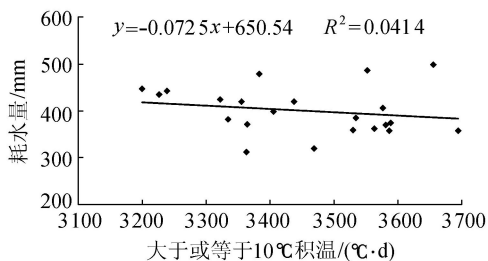
3.4 玉米耗水量与气温和降水的关系

降水与温度是影响土壤含水量及作物耗水量的主要气象因子,对辽西北玉米耗水量与同期生长季降水量、积温($\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温)进行相关分析,如

图4所示,玉米耗水量与降水量呈正相关关系,达到极显著水平($P < 0.01$),而玉米耗水量与积温呈负相关关系,相关性较小,未达到显著水平。



(a) 与降水量的关系



(b) 与积温的关系

图4 玉米耗水量与生长季内同期降水量、活动积温的相关关系

从单因子线性拟合可以看出单一要素对作物耗水量的影响程度,但没有考虑因子之间的相互作用,为进一步研究降水量与积温对玉米耗水量的综合影响,进行多元回归分析。玉米耗水量 y 与降水量 x_1 、积温 x_2 之间的回归关系式为

$$y = 0.73x_1 + 0.04x_2 - 21.54 \quad (R^2 = 0.793) \quad (9)$$

回归效果达到 $P = 0.01$ 的极显著水平。总体来看,积温对作物耗水量的影响较小,而降水量与耗水量呈明显正相关关系。玉米的需水期与当地的水热条件基本吻合,因此在当地得到广泛种植。

4 结 论

a. 近年来,辽西北干暖化趋势明显:全年降水量年均减少约5.3 mm,玉米生长季降水量下降趋势更为明显,每年减少6.3 mm;温度年均升高 0.04°C ,生长季内活动积温年均升高 13.57°C 。

b. 辽西北玉米耗水量总体呈下降趋势,并且下降速率比较大。在20多年中,1992年玉米耗水量最小,为312 mm;1994年玉米耗水量最大,达498 mm。20世纪80年代,辽西北玉米耗水量下降趋势明显;90年代为剧烈的震荡期;21世纪以来进入平稳期,但依然呈下降趋势。

c. 辽西北玉米耗水量的等值线梯度较小,空间分布比较均匀;高值中心和低值中心的分布较为分散,玉米耗水量的高值区位于彰武县,达494 mm,其

次是义县、朝阳市和黑山县等,而玉米耗水量低值区位于新门市,为 331 mm。

d. 玉米在不同旱涝等级下的耗水特征与降水量呈极显著相关关系,不同旱涝等级下耗水量从大到小排序为大涝、偏涝、正常、偏旱、大旱。总体来看,降水和气温的变化对作物耗水量均有影响,其中积温对作物耗水量的影响较小,而降水量与耗水量呈明显正相关关系。

参考文献:

[1] 曹永强,张兰霞,张岳军,等. 基于 CI 指数的辽宁省气象干旱特征分析[J]. 资源科学,2011,34(2):265-272. (CAO Yongqiang,ZHANG Lanxia,ZHANG Yuejun,et al. Analysis of drought characteristics of Liaoning Province based on the CI index [J]. Resources Science,2011,34(2):265-272. (in Chinese))

[2] 杨海焕. 辽西北地区农业干旱灾害风险评价与风险区划研究[D]. 长春:东北师范大学,2009.

[3] 赵凌玉,潘志华,安萍莉,等. 北方农牧交错带作物耗水特征及其与气温和降水的关系:以内蒙古呼和浩特市武川县为例[J]. 资源科学,2012,34(3):401-408. (ZHAO Lingyu,PAN Zhihua,AN Pingli,et al. Water consumption characteristics of crop in North Agro-Pastoral Area and its relationship to temperature and precipitation: a case study in Wuchuan County[J]. Resources Science,2012,34(3):401-408. (in Chinese))

[4] 李占玲,徐宗学. 近 50 年来黑河流域气温和降水量突变特征分析[J]. 资源科学,2011,33(10):1877-1882. (LI Zhanling,XU Zongxue. Detection of change points in temperature and precipitation time series in the Heihe River Basin over the past 50 years [J]. Resources Science,2011,33(10):1877-1882. (in Chinese))

[5] 郭亮,杜鹏,肖乾广,等. 用气象卫星遥感方法监测中国季风区气候敏感带蒸散量的年际变化[J]. 植物学报,1997,39(9):841-844. (GUO Liang,DU Peng,XIAO Qianguang,et al. Monitoring inter-annual variation of evapotranspiration with meteorological satellite remote sensing method in China monsoon transect [J]. Chinese Bulletin of Botany,1997,39(9):841-844. (in Chinese))

[6] 詹志明,冯兆东,秦其明. 陇西黄土高原陆面蒸散的遥感研究[J]. 地理与地理信息科学,2004(1):10-16. (ZHAN Zhiming,FENG Zhaodong,QIN Qiming. Study on land surface evapotranspiration based on remote sensing data on Longxi Loess Plateau of China[J]. Geography and Geo-Information Science,2004(1):10-16. (in Chinese))

[7] 庞治国,付俊娥,李纪人,等. 基于能量平衡的蒸散发遥感反演模型研究[J]. 水科学进展,2004(3):364-369. (PANG Zhiguo,FU June,LI Jiren,et al. Remote sensing model for estimating evapotranspiration based on energy

balance[J]. Advances in Water Science,2004(3):364-369. (in Chinese))

[8] 邹旭恺,张强. 近半个世纪我国干旱变化的初步研究[J]. 应用气象学报,2008,19(6):679-687. (ZOU Xukai,ZHANG Qiang. Preliminary studies on variations in droughts over China during past 50 years[J]. Journal of Meteorological Science,2008,19(6):679-687. (in Chinese))

[9] 王璞. 农作物概论[M]. 北京:中国农业大学出版社,2004.

[10] 刘战东,肖俊夫,刘祖贵,等. 膜下滴灌不同灌水处理对玉米形态、耗水量及产量的影响[J]. 灌溉排水学报,2011,30(3):60-64. (LIU Zhandong,XIAO Junfu,LIU Zugui,et al. Effects of different irrigation treatment on morphological indexes, water consumption and yield of maize under mulch drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2011,30(3):60-64. (in Chinese))

[11] 武艳萍. 农牧交错带气候资源变异及作物结构调整分析:以武川县为例[D]. 北京:北京农业大学,2004.

[12] 杨晶. 阴山北麓农牧交错带气候变化及作物适应性研究:以武川县为例[D]. 北京:北京农业大学,2007.

[13] 谭继强,丁明柱. 空间数据插值方法的评价[J]. 测绘与空间地理信息,2004,27(8):11-13. (TAN Jiqiang,DING Mingzhu. An evaluation of spatial data interpolation methods[J]. Geomatics & Spatial Information Technology,2004,27(8):11-13. (in Chinese))

[14] KIFE G W. Frequency and risk analysis in hydrology[M]. Colorado:Water Resources Publication,1978.

[15] GB/T 20481—2006 气象干旱等级[S].

[16] 付凤玲,周树峰,潘光唐,等. 玉米耐寒系数的多元回归分析[J]. 作物学报,2003,29(3):468-472. (FU Fengling,ZHOU Shufeng,PAN Guangtang,et al. Multiple regression analysis of drought tolerance coefficients in maize[J]. Acta Agronomica Sinica,2003,29(3):468-472. (in Chinese))

[17] 孙振宇. 多元回归分析与 Logistic 回归分析的应用研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2008.

(收稿日期:2013-05-29 编辑:骆超)

