

宁夏参考作物蒸散量的时空变化特征分析

刘文娟¹,安瑞平¹,连晋姣²

(1. 宁夏大学 农学院,宁夏 银川 750021;2. 中国科学院 亚热带农业生态研究所,亚热带农业生态过程重点实验室,湖南 长沙 410125)

摘 要:为了确定合理的灌溉制度,保护生态环境,应用 Penman-Monteith 公式以宁夏2000—2012年的气象观测资料计算了参考作物蒸散量。在此基础上采用克里格(Kriging)插值方法,生成宁夏参考作物蒸散量分布图。结果表明,宁夏地区平均参考作物蒸散量的多年平均值为 964.92 mm, ET_0 随时间呈显著下降趋势,下降幅度约为 $1.14 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。年参考作物蒸散量的空间分布总趋势自北向南逐渐减小,北部引黄灌区最大 $1\,136.40 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,南部山区最小 $706.0 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。年内季节变化为夏季>春季>秋季>冬季;逐月变化呈单峰变化趋势,峰值出现在 6 月,5—7月参考作物蒸散量均较大,占年值的 43%,这与当地气候相吻合。

关键词:参考蒸散;GIS;时空分布特征;Penman-Monteith 公式

中图分类号:S161.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)01-0069-05

Temporal-spatial Characteristics of Reference Crop Evapotranspiration in Ningxia

LIU Wen-juan¹, AN Rui-ping¹, LIAN Jin-jiao²

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China)

Abstract: In order to establish a reasonable crop irrigation system and to preserve eco-environment, reference crop evapotranspiration (ET_0) in Ningxia was calculated by Penman-Monteith equation based on the meteorological data during 2000 to 2012. The distribution pattern of ET_0 was charted by using the Kriging interpolation method. The multi-year average ET_0 was 964.93 mm, it decreased significantly with an average of $1.14 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$. For the special distribution, the annual ET_0 decreased from north to south generally: higher in north plain ($1\,136.40 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$), and lower in south mountainous region ($706.02 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$). Seasonal ET_0 was in the order of summer>spring>autumn>winter. Within a year, it was high from May to August and low from November to next February, while the highest value appeared in June, accounted for 43% of the total year, which was in accordance with the local climate.

Key words: reference crop evapotranspiration; GIS; spatiotemporal pattern; Penman-Monteith equation

参考作物蒸散量是重要的水资源分量,也是作物需水量预测以及农田水分管理的重要基础参数。作物需水的预测对合理利用水资源、缓解其供需矛盾有重要意义。参考作物蒸散量是作物需水预测中的关键参数,该参数受多种因素的影响,在大区域范围内实际测定难度比较大,是个难以准确测定的参数^[1],所以通常采用模型进行估算。FAO-56 的 Penman-Monteith 法是目前计算参考作物蒸散量精

度较高,应用最广泛的方法^[2-5]。该方法以能量平衡方程和水汽扩散理论为基础,充分考虑影响蒸散的各种因素,具有较高的理论依据,计算所得参考作物蒸散量仅受制于当地的气候条件(例如温度、辐射强度、湿度和风速等),而与作物种类、土壤类型等条件无关^[6-10]。近年来,有学者对西北旱区和黄土高原参考蒸散的研究,而有关宁夏地区近年来最新数据的参考蒸散量时空变化特征及其成因的系统研究目

前还少见报道。基于 Penman-Monteith 方程,利用宁夏 9 个气象站点最新数据 2000—2012 年日平均气温、风速、日照时数和相对湿度等气象资料,研究该区域参考作物蒸散量的时空变化规律,进一步确定作物需水量和区域生态需水量的变化情况,对于该地区水资源的优化分配和生态环境恢复具有重要的指导意义。

1 研究区概况

宁夏回族自治区位于黄河中上游黄土高原西北部,35°14′—39°23′N,104°17′—107°39′E,面积 6.64 万 km²[11]。宁夏属于典型的大陆性气候,日照充足,干旱少雨,年平均气温为 5~9℃,多年平均降水量 292 mm,且南多北少,年蒸发量>2 000 mm。根据宁夏的气候条件、农牧业分布情况和生态环境状况,分为 3 个区域。宁夏北部是银川平原,由于黄河从中部进入宁夏,给银川平原带来丰富的水源,是宁夏最富庶的地区,又称北部引黄灌区,年降水量为 200 mm 左右。宁夏中部是干旱带,多为丘陵山地和山间盆地,气候干燥,植被稀少,是典型的荒漠化草原,年降水量为 200~400 mm。南部则是黄土高原的一部分,平均海拔为 2 000 m 左右,植被丰富,是宁夏最潮湿的地方,年降水量>400 mm。

2 研究方法

根据中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)提供的研究区内的国家基准站点宁夏 9 个气象台站(图 1)的观测资料(月平均最高温度、最低温度、日照时数、相对湿度、风速),采用 FAO-56 的 Penman-Monteith 公式计算每年参考作物蒸散量,具体的计算公式为[4]

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中:ET₀ 为参考作物潜在蒸发蒸腾量(mm);Δ 为饱和水汽压与温度曲线的斜率(kPa·℃⁻¹);R_n 为作物表面的净辐射量(MJ·m⁻²·d⁻¹);G 为土壤热通量(MJ·m⁻²·d⁻¹);T 为 2 m 高处的气温(℃);u₂ 为 2 m 高处的日平均风速(m·s⁻¹);e_s 为饱和水汽压(kPa);e_a 为实际水汽压(kPa);γ 为干湿表常数(kPa·℃⁻¹);

主要参数的计算方法为:

$$\Delta = e_s \left(\frac{17.269T}{T + 237.3} \right) \left(1 - \frac{T}{T + 237.3} \right) \quad (2)$$

$$e_s = 0.61078 \exp \left(\frac{17.269T}{T + 237.3} \right) \quad (3)$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (4)$$

$$R_{ns} = (1 - 0.23) \left(a + b \frac{n}{N} \right) R_a \quad (5)$$

式中:R_{ns} 为太阳净短波辐射,R_{nl} 为净长波辐射。n 为日照时数,N 为可照时数,R_a 为宇宙辐射,a、b 为辐射项参数,选择 FAO 推荐值 a 和 b 分别为 0.25 和 0.5。

$$R_{nl} = 4093 \times 10^{-9} \times W \left(\frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2} \right) (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) (1.35 \frac{R_s}{R_{s0}} - 0.35) \quad (6)$$

计算用到的其余参数均采用 FAO 标准推荐[6]。

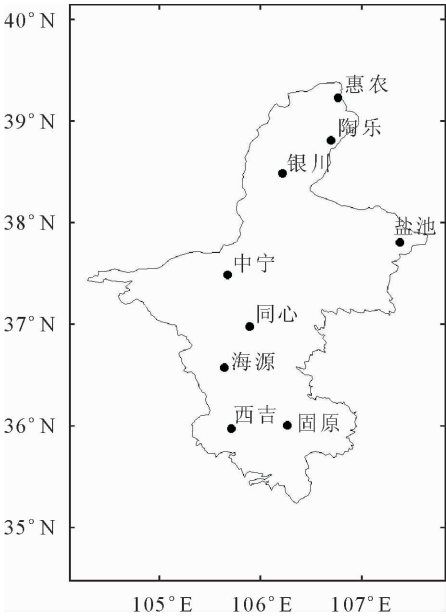


图 1 宁夏气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological observation stations in Ningxia

选用 ArcGIS 9.3 空间插值方法中的克里格(Kriging)插值法做基于站点的 ET₀ 空间栅格化,获得每个栅格单元的 ET₀ 值,使 ET₀ 在空间连续分布,为分析研究区参考作物蒸散量的时空变化规律提供精细化数据。克里格空间插值方法是 ArcGIS 软件地理统计插值方法,该方法是建立在地学统计思想上的空间局部插值方法,对空间分布具有随机性与结构性的变量的研究具有独特的优点[7]。克里格插值的实质是利用区域化变量的原始数据和变异函数的结构特点,对未采样点的区域化变量的取值进行线性无偏最优化估计[10-11]。近年来在气象、地质等研究领域得到广泛应用[14-16]。本研究借助于 GIS 空间分析功能,建立区域参考作物蒸散量的空间分布模型,并在此基础上分析近期(2000—2012 年)研究区作物生长季参考作物蒸散量的时空分布特征。

3 结果与分析

3.1 宁夏参考作物蒸散量的时间变化

3.1.1 年际变化特征 由各气象站 2000—2012 年 ET_0 的年均值,得到整个研究区近 13 a ET_0 的年均值。图 2 为研究区平均 ET_0 的年际变化曲线及线性趋势线,可以看出:研究区平均 ET_0 的多年平均值为 964.92 mm, ET_0 的波动范围为 825.23~1 128.39 mm,最小值出现在 2011 年,约为 825.23 mm,最大值出现在 2000 年,约为 1 128.39 mm,最大值与最小值之比为 1.37。线性趋势线表明 ET_0 随时间呈下降趋势,下降幅度约为 $1.14\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。研究表明近 13 a 宁夏地区参考作物蒸散量呈下降趋势,这与之前的全球气候变暖可能会使大气变干、地表蒸发量增大及加速全球水循环这一观点的预期结果相反^[17]。说明温度并不是唯一决定蒸散量变化的因素。从 Penman-Monteith 公式中可知^[4,6],参考作物蒸散量的大小及变化是由 2 大项要素决定的。第 1 项 $0.408\Delta(R_n-G)$ 为能量项,主要受到地表面的太阳辐射的大小和变化影响;第 2 项 $\gamma C_n/(T+273)\cdot u_2\cdot(e_s-e_a)$ 为动力项,主要受风速、温度和空气湿度的影响^[8]。所以,近年来,尽管宁夏年平均气温呈上升趋势,但由于日照时数减少、风速减小、空气湿度增大等对参考作物蒸散量的减少作用超过由气温升高产生的增大作用。因此,宁夏年参考作物蒸散量呈极显著的减小趋势。

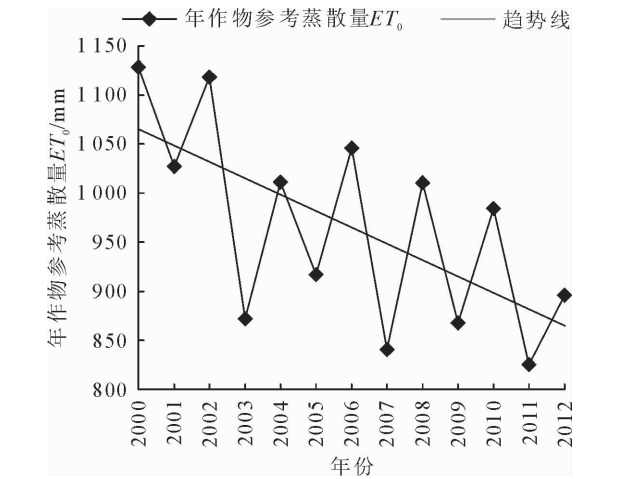


图 2 2000—2012 年年平均参考作物蒸散量时间分布
Fig. 2 Temporal changes of average annual reference crop evapotranspiration during 2000 and 2012

分别计算宁夏全区、北部引黄灌区、中部干旱带及南部山区各区的蒸散量及距平,利用距平法对宁夏全区及 3 个分区进行分析,图 3 中可以看出,中部干旱区与南部山区在空间尺度下 ET_0 年值距平变化过程非常相似,最大负距平均出现在 2011 年,且

13 a 中累积负距平年数为均 7。全区与中部干旱区和南部山区的在空间尺度下 ET_0 年值距平变化过程非常相似。北部引黄灌区距平为明显的下降,负距平年数达到 9 a,从 2006 年到 2012 年蒸散量均为低于多年平均值,说明该区年参考作物蒸散量呈下降趋势。

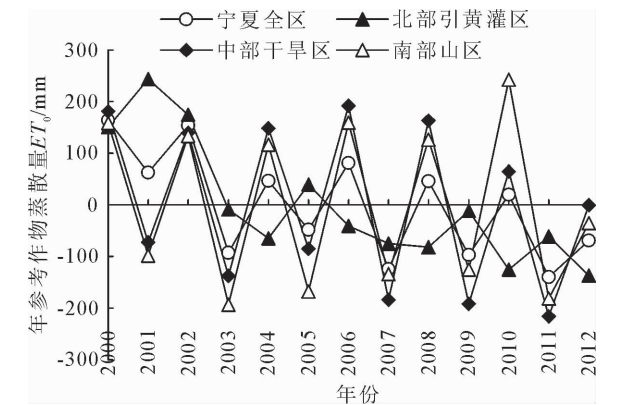


图 3 宁夏各分区年平均参考作物蒸散量距平变化
Fig. 3 Temporal changes of average annual reference crop evapotranspiration anomaly in different regions

3.1.2 逐月及季节变化 由图 4 可以看出年内分配差异较大,各月参考作物蒸散量呈单峰抛物线变化趋势,峰值出现在 6 月份,为 $147.05\text{ mm}\cdot\text{月}^{-1}$ (强度为 $4.90\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$);最小值则出现在 12 月份,为 $25.62\text{ mm}\cdot\text{月}^{-1}$ (强度为 $0.83\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$),极值比达 5.74。从时段来看 5—7 月份参考作物蒸散量均较大,占年值的 43%,这与当地气候相吻合。总体上,夏季作物参考蒸散量最大,春季高于秋季,冬季最小。由于参考作物蒸散量主要受辐射、日照时数、气温、湿度以及风速的影响。春夏季辐射强烈、日照时间长、气温高、风速大,增加了白天蒸散的时间,也提高了蒸散的效率,所以参考作物蒸散量偏高,秋冬季节则恰好相反。因此,表现出夏季蒸散大、冬季蒸散小的特征。一年之中,参考作物蒸散量的高值集中在春夏季(3—8 月),多年平均为 716.81 mm;秋冬季(9 月至翌年 2 月)的参考作物蒸散量的数值较小,多年平均约为 264.46 mm(表 1)。

表 1 各季节平均参考作物蒸散量	
Table 1 Seasonal average reference crop evapotranspiration	
季节	平均值/mm
春季(3—5 月)	321.21
夏季(6—8 月)	395.60
秋季(9—11 月)	158.47
冬季(12—翌年 2 月)	105.99

3.2 宁夏参考作物蒸散量的空间变化

利用 Arc GIS 9.3 空间插值方法中的 Kriging 法进行基于站点的 ET_0 空间栅格化,得到了每个栅

格单元的 ET_0 值,从而使 ET_0 在空间上连续分布,为分析宁夏 ET_0 的空间变化提供了精细数据。

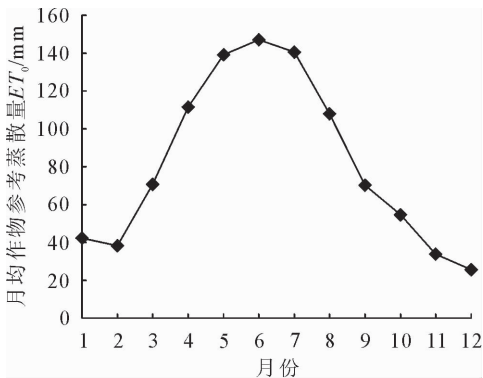


图 4 2000—2012 年逐月平均参考作物蒸散量变化趋势
Fig. 4 Monthly changes of reference crop evapotranspiration during 2000 to 2012

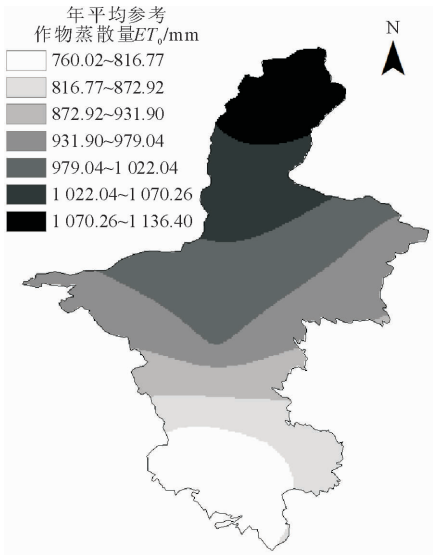


图 5 2000—2012 年年平均参考作物蒸散量空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of average annual reference crop evapotranspiration during 2000 to 2012

多年平均参考作物蒸散量的空间分布如图 5。空间分布自北向南呈逐渐减少的趋势,高值区位于北部的引黄灌区、低值区位于南部山区。空间分布特征与宁夏气温变化特征和气候区分布有高度的空间对应关系,其空间分布与各地气温、降水量、日照时数、平均风速和空气相对湿度具有较好的对应关系,具体表现为,气温高、降水少、日照足、风速大、空气干燥的区域,春夏参考作物蒸散量较大。北部引黄灌区气温高于南部山区,可以接收更多的太阳辐射,为蒸散活动提供比较充足的能量来源;而且与南部半湿润区相比较,中北部干旱半干旱区空气相对湿度较低,可加快地表空气流动及水汽运移,蒸散活动强烈。

本研究选择主要的 5 个气象因素分析 ET_0 时

空变化的原因(表 2),由表 2 可知,对整个研究区而言蒸散量与最高温度、平均温度、日照时数和平均风速均呈的正相关,其中北部引黄灌区和中部干旱带与风速正相关性最大,南部山区与日照时数正相关性最大,但基本趋势都一致。各区的参考蒸散量与最高温度的相关性均大于平均温度。蒸散量与相对湿度呈负相关关系。上述分析表明,造成宁夏参考作物蒸散量空间分布差异的实质是各地气候条件的显著差异。

表 2 2000—2012 年宁夏参考作物蒸散量与同期主要气候要素的相关系数

Table 2 The correlation coefficient between ET_0 and climate variables during 2000 to 2012 in Ningxia					
	平均风速	日照时数	平均温度	最高温度	相对湿度
北部引黄灌区	0.70	0.44	0.33	0.41	-0.41
中部干旱区	0.61	0.46	0.24	0.40	-0.3
南部山区	0.31	0.52	0.33	0.46	-0.36
宁夏全区	0.54	0.47	0.30	0.42	-0.36

4 结论与讨论

研究区平均参考作物蒸散量的多年平均值为 964.92 mm,参考作物蒸散量的波动范围为 825.23 mm~1 128.39 mm,且随时间呈波动下降趋势,下降幅度约为 $1.14 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,但地区间存在差异,北部引黄灌区的下降趋势更为剧烈。13 a 中,北部引黄灌区的负距平为 9 a,且 2006—2012 年蒸散量均为负距平。年参考作物蒸散量空间分布的总趋势为自北向南逐渐减小,北部引黄灌区最大 $1 136.40 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,南部山区最小 $706.02 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。各地的气候条件的差异造成了宁夏参考作物蒸散量空间差异。

参考作物蒸散量的季节变化为:春夏季数值较大,秋冬季数值较小。月变化为,年内分配差异较大,各月参考作物蒸散量为单峰抛物线变化趋势,峰值出现在 6 月份,为 $147.05 \text{ mm} \cdot \text{月}^{-1}$;最小值则出现在 12 月份,为 $25.62 \text{ mm} \cdot \text{月}^{-1}$,极值比达 5.74。从时段来看 5—7 月参考作物蒸散量均较大,占年值的 43%,这结果与当地气候相吻合。春夏季辐射增强、日照时间长、气温高、风速大,增加了白天的蒸散时间,也提高了蒸散效率,所以参考作物蒸散量偏高,秋冬季节则正好相反。

近 13 a 来宁夏参考作物蒸散量为减小趋势,这对增加土壤含水量、调整灌溉定额、改善脆弱的生态环境都具有重要意义。本研究可为研究区农业可持续发展和生态保护提供最新有效数据支持。由于影响参考作物蒸散量变化的气候因素复杂,未来宁夏

的气候变化还有很多不确定因素。因此,有关宁夏参考作物蒸散量时空分布规律及其对未来气候变化的响应研究,需要随着数据的更新进一步深入。

参考文献:

[1] 徐新良,张纪远,庄大方. GIS 环境下 1991—2000 年中国东北参考作物蒸散量时空变化特征分析[J]. 农业工程学报,2004,20(2):10-14.

[2] 于东平,张鑫,何毅,等. 青海省东部高原农业区参考作物蒸散量的时空变化[J]. 农业工程学报. 2012,28(2):66-71.
YU D P,ZHANG X,HE Y,*et al.* Temporal-spatial variations of reference crop evapotranspiration in eastern plateau agricultural region of Qinghai Province [J]. Transactions of the CSAE,2012,28(2):66-71. (in Chinese)

[3] HASHMI M A,CARCIA L A. Spatial and temporal errors in estimating regional evapotranspiration[J]. Journal of Irrigation and Drainages Engineering,1998,124(2):108-114.

[4] 刘胜,贺康宁. 基于 Penman-Monteith 模型的林木日蒸腾模拟[J]. 西北林学院学报,2006,21(3):15-20.
LIU S,HE K N. Modeling of the daily forestry transpiration variation based on Peman-Monteith model [J]. Journal of Northwest Forestry University,2006,21(3):15-20. (in Chinese)

[5] 杨荣慧,张国云,张一平,等. 田间土壤水分蒸散模型研究[J]. 西北林学院学报,2005,20(2):86-89.
YANG R H,ZHANG G Y,ZHANG Y P,*et al.* Research on the model of soil water evaporation on field[J]. Journal of Northwest Forestry University,2005,20(2):86-89. (in Chinese)

[6] ALLEN R G,PEREIRA L S,RAES D,*et al.* Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements [M]// FAO Irrigation and Drainage Paper (No. 56) . Rome: FAO,1998:15-64.

[7] ALLEN R G,SMITH M,PERRIER A,*et al.* An update for the calculation of reference evapotranspiration [J]. ICID Bulletin,1994,43(2):35-92.

[8] 吴文玉,马晓群,陈晓艺. GIS 支持下安徽省近 35 a 参考作物蒸散量的时空变化[J]. 农业工程学报,2010,26(2):251-256.

[9] 普宗朝,张山清. 近 48 年新疆夏半年参考作物蒸散量时空变化[J]. 中国农业气象,2011,32(1):67-72.
PU Z C,ZHANG S Q. Study on spatial-temporal variation

characteristic of summer half year ET_0 in recent 48 years in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2011,32(1):67-72. (in Chinese)

[10] 张山清,普宗朝. 新疆参考作物蒸散量时空变化分析[J]. 农业工程学报,2011,27(5):73-79.

[11] 王志良,杨婷. 宁夏水资源可持续利用的理性思考[J]. 水土保持研究,2006,13(6):278-281.
WANG Z L,YANG T. Rational thought of sustainable utilization of water resources in Ningxia[J]. Research of Soil and Water Conservation,2006,13(6):278-281. (in Chinese)

[12] 曾丽红,宋开山,张柏,等. 近 60 年来东北地区参考作物蒸散量时空变化[J]. 水科学进展,2010,21(2):194-200.
ZENG L H,SONG K S,ZHANG B,*et al.* Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration over the northeast region of China in the last 60 years[J]. Advances in Water Science,2010,21(2):194-200. (in Chinese)

[13] 史建国,严昌荣,何文清,等. 黄河流域潜在蒸散量时空格局变化分析[J]. 干旱区研究,2007,24(6):773-778.
SHI J G,YAN C R,HE W Q,*et al.* Study on spatiotemporal change of evapotranspiration in the yellow river basin[J]. Arid Zone Research,2007,24(6):773-778. (in Chinese)

[14] 李海滨,林忠辉,刘苏峡. Kriging 方法在区域土壤水分估值中的应用[J]. 地理研究,2001,20(4):446-452.
LI H B,LIN Z H,LIU S X. Application of Kriging technique in estimating soil moisture in China[J]. Geographical Research,2001,20(4):446-452. (in Chinese)

[15] 邵晓梅,严昌荣,魏红兵. 基于 Kriging 插值的黄河流域降水时空分布格局[J]. 中国农业气象,2006,27(2):56-69.
SHAO X M,YAN C R,WEI H B. Spatial and temporal structure of precipitation in the yellow river basin based on Kriging method[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2006,27(2):56-69. (in Chinese)

[16] 李新,程国栋,卢玲. 空间内插方法比较[J]. 地理科学进展,2000,15(3):260-265.
LI X,CHENG G D,LU L. Comparison of spatial interpolation methods[J]. Advance in Earth Sciences,2000,15(3):260-265. (in Chinese)

[17] LIU B M,XU M,HENDERSON W,*et al.* A spatial analysis of pan evaporation trends in China,1955—2000[J]. Geophys. Res. ,2004,109:15102-15110.