

基于 GIS 的石羊河流域玉米气候生产潜力分析

孙世坤, 蔡焕杰, 王 健

(西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】 **【目的】**分析石羊河流域种植玉米的光合生产潜力、光温生产潜力和气候生产潜力,探索影响石羊河流域玉米产量的主要限制因素,为当地的玉米生产提供参考。**【方法】**利用石羊河流域 1980—2005 年的气象数据,采用机制法分析该流域玉米的光合、光温和气候生产潜力,并结合 ArcviewGIS 软件分析其空间分布规律;利用 FAO 的 CROPWAT 模型,分析玉米生育期蒸发蒸腾量的变化规律,提出相应的灌溉建议,发掘作物生产潜力,提高流域玉米的产量。**【结果】**石羊河流域玉米光合、光温生产潜力分别为 22 704.79~25 732.44 和 10 665.73~17 189.27 kg/hm²,二者的空间分布规律大致为由北向南逐渐降低;气候生产潜力为 360.97~3 947.91 kg/hm²,空间分布规律为由北至南递增;综合分析认为,石羊河流域玉米光合、光温生产潜力处于全国中等水平,而气候生产潜力处于较低水平;CROPWAT 模型分析表明,玉米需水关键期为 6 月下旬至 7 月下旬,即拔节-抽穗期,此时是玉米产量形成的关键期,应该保障该时期玉米的灌溉用水。**【结论】**石羊河流域玉米气候生产潜力的主要限制因素是水分条件,要充分发掘石羊河流域玉米的生产潜力,就应在玉米的关键需水期进行适时灌溉。

【关键词】 石羊河流域;玉米;气候生产潜力;GIS;CROPWAT 模型;灌溉决策

【中图分类号】 S162.5⁺2;S162.5⁺3 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1671-9387(2010)06-0211-09

Study on climatic potential productivity of maize based on GIS technology in Shiyang River Basin

SUN Shi-kun, CAI Huan-jie, WANG Jian

(Key Laboratory of Agricultural Soil & Water Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** The purpose of the present study was to analyze the photosynthetic potential productivity, light-temperature potential productivity and climatic potential productivity of maize in Shiyang River Basin, so as to explore the major limiting factor of maize production and to provide references for local maize production. **【Method】** According to the meteorological data from 1980 to 2005 in Shiyang River Basin, the mechanism methodology was adopted to analyze the photosynthetic potential productivity, light-temperature potential productivity and climatic potential productivity of maize, and together with the ArcviewGIS software to analyze the spatial distribution of the three; and the FAO CROPWAT model was taken to analyze the variation of maize's evapotranspiration and the corresponding suggestion for irrigation was put forward in order to improve maize yield in Shiyang River Basin. **【Result】** The photosynthetic potential productivity and light-temperature potential productivity of maize were between 22 704.79—25 732.44 kg/hm² and 10 665.73—17 189.27 kg/hm² respectively in Shiyang River Basin, and the spatial distribution tendency of them decreased from north to south. The climatic potential productivity of maize was from 360.97—3 947.91 kg/hm², and its distribution tendency increased from north to south; After comprehensive analysis, the value of photosynthetic potential productivity and light-temperature potential

* [收稿日期] 2009-10-12

[基金项目] 国家“863”高新技术研究与发展计划项目(2006AA100202);国家科技支撑计划项目(2007BAD88B10)

[作者简介] 孙世坤(1984—),男,山东济宁人,在读硕士,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: feissk@163.com

[通信作者] 蔡焕杰(1962—),男,河北藁城人,教授,主要从事农业节水与水资源高效利用研究。E-mail: caihj@nwsuaf.edu.cn

productivity of maize in Shiyang River Basin were in the state of medium range in China, while the climatic potential productivity of maize was at a low level. The results from the CROPWAT model showed that the critical period of maize water consumption was from late June to late July, which was the critical period of yield formation of maize, so irrigation water should be guaranteed in this period. 【Conclusion】 The main limiting factor of climatic potential productivity of maize is water condition. In order to fully exploit the potentiality of maize production, irrigation should be applied during the critical period of maize water consumption.

Key words: Shiyang River Basin; maize; climatic potential productivity; GIS; CROPWAT model; irrigation decision

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部,居乌鞘岭以西、祁连山北麓,位于东经 101°41′~104°16′,北纬 36°29′~39°27′^[1]。石羊河是我国内陆河流域中人口最密集、水资源开发利用程度最高、用水矛盾最突出、生态环境问题最严重的流域之一。作物气候生产潜力(也称为降水生产潜力)是评价农业气候资源的依据之一,农业气候生产潜力的大小,取决于光、温、水三要素的数量及其相互配合协调的程度^[2]。对石羊河流域的气候生产潜力进行估算,其结果不仅可以直接反映该地区的气候生产力水平和光、温、水资源配合协调的程度及其地区差异,而且可以分析不同要素对石羊河流域作物生产力影响的大小,从而找出作物生产中的主要限制因素^[3]。

评价作物生产潜力开始于光合生产潜力的研究。美国的 Loomis 等^[4]从作物的光合效率及干物质生产潜力的角度出发,利用量子效率概念进行了生产潜力研究,提出生物生产量(Y)与太阳总辐射(Q)之间的估算模式。之后,联合国粮农组织(FAO)提出了农业生态地区(AEZ)法,对光温生产潜力进行了较为深入的研究,其思路和方法框架被世界不同区域采用^[5]。随后,关于作物生产潜力的研究逐步转向气候生产潜力,即将光照、温度、降水等因素综合考虑来探讨作物生产潜力。近些年,国内学者也对作物生产潜力进行了研究,如冷石林^[6]在北方旱农地区通过 4 年的大田试验和统计分析,明确了开发北方旱农地区气候生产潜力的限制因素,提出了以提高农田水分利用率和水分利用效率为中心的降水生产潜力开发途径关键技术体系。

随着地理信息系统(GIS)在农业中的应用,一些学者将 GIS 引入了作物生产潜力的研究。James 等^[7]将 GIS 与作物模型结合起来研究作物生产潜力,取得了较为理想的结果。周治国等^[8]利用知识模型和 GIS 对江苏地区作物生产潜力区域优势进行实例评价,取得了较好的效果。但总的来看,以往对作物生产潜力研究的尺度多处于省级或大区局层次,

而对于石羊河流域这样区县级层次的研究较少,将 GIS 技术引入到作物气候生产潜力的研究,在国内尚处于起步阶段。为此,本研究在收集石羊河流域主要站点表征光能资源、热量资源、降水状况等气象资料 and 主要作物生长发育期及产量资料的基础上,利用 GIS 建立石羊河流域的空间、气候、作物参数等属性数据库,然后根据机制法的原理与模型,按照光、温、水逐级衰减的过程,分别估算石羊河流域玉米的光合、光温和气候(降水)生产潜力;同时,还将 FAO 开发的 CROPWAT 模型应用于作物生产潜力的辅助研究,用其分析玉米生育期蒸发蒸腾量的变化规律,推荐灌溉制度,以发掘作物生产潜力,提高玉米产量,为加快石羊河流域经济发展提供支持。

1 资料来源与研究方法

1.1 资料选取

所用数据包括气象数据、空间数据和作物参数。

1)气象数据。气象数据为石羊河流域民勤、金川、永昌、凉州、山丹、古浪、景泰、肃南地区 1980—2005 年的气象资料,包括:①月平均最高、最低气温;②月降水量;③风速;④日照时数;⑤相对湿度;⑥太阳辐射。

2)空间数据。空间数据为石羊河流域行政区划图,见图 1^[9]。



图 1 石羊河流域行政区划图
Fig. 1 Administrative map of Shiyang River Basin

3)作物参数。作物数据包括玉米的种植日期、生育期、各生育期作物系数等。

1.2 气候生产潜力的研究方法

利用石羊河流域主要站点的气象资料和作物生长发育期资料,根据“机制法”的原理,按照光、温、水逐级“修正”的过程,分别估算了石羊河流域玉米的光合生产潜力、光温生产潜力和气候生产潜力。然后,利用 Arcview3.3 软件将光合、光温、气候生产潜

力导入属性数据库,制成石羊河流域光合、光温、气候生产潜力空间分布专题图,研究其空间变化规律。最后,分析石羊河流域光合、光温、气候生产潜力,找出影响石羊河流域玉米生产潜力的主要限制因素。用 CROPWAT 模型分析石羊河流域玉米需水量,并根据玉米生育期蒸发蒸腾量的变化规律,提出灌溉对策,降低水分条件对流域玉米产量的限制,提高玉米产量。其流程如图 2 所示。

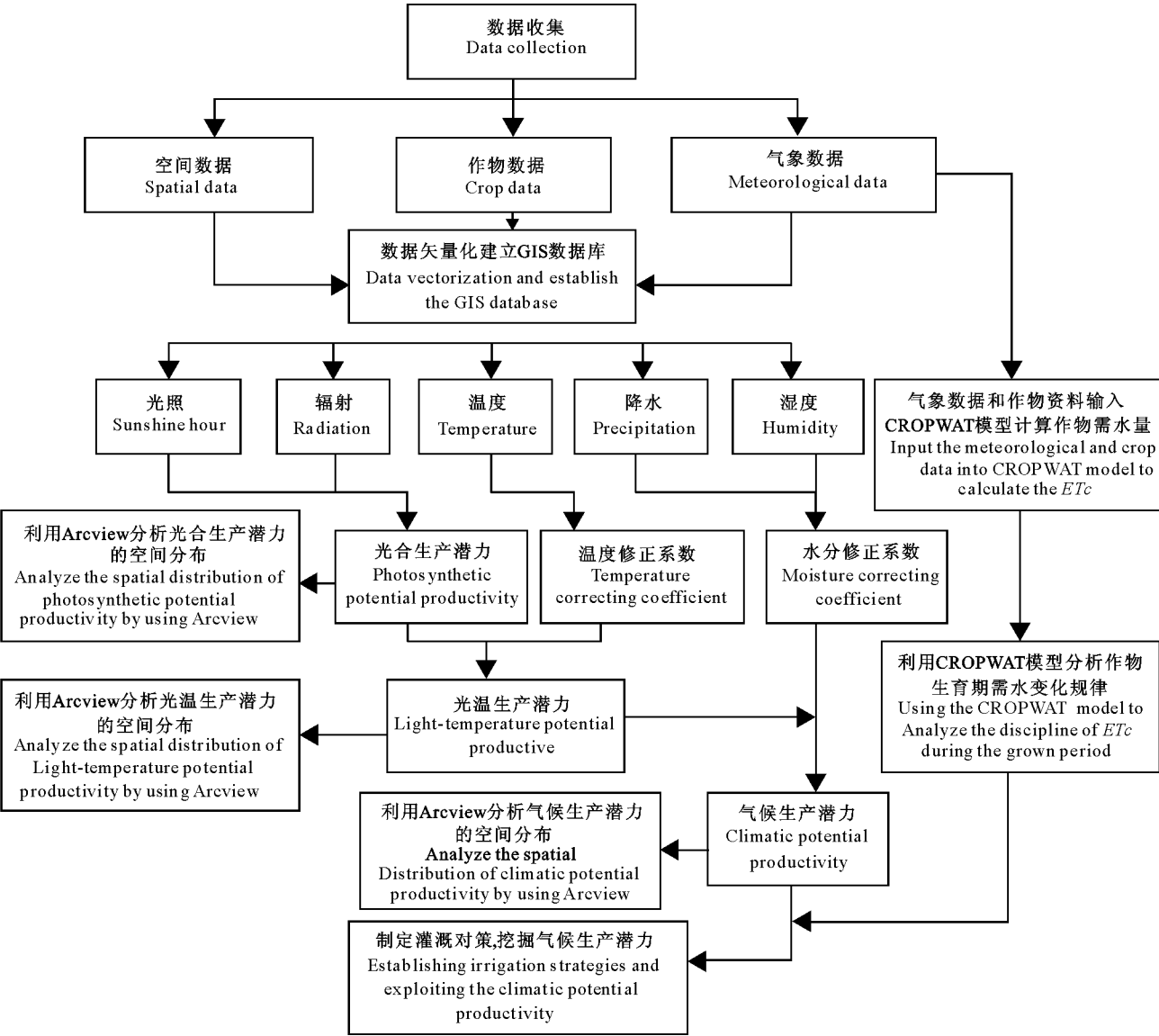


图 2 气候生产潜力分析流程图

Fig. 2 Flow chart of climatic potential productivity analysis

1.3 作物气候生产潜力的计算

采用机制法计算石羊河流域主要农作物的气候生产潜力。机制法是根据作物生产力形成的机理,考虑光、温、水、土等自然生态因子,对光合、光温生产潜力进行逐步“修正”,进而得到作物气候生产潜

力的方法。具体计算过程中,在每一生产潜力层次只考虑一种主要限制因子,并假设其他后续因子均处于理想状态,气候生产潜力的计算公式为^[10]:

$$Y_w = Q \times f(Q) \times f(T) \times f(W) = Y_Q \times f(T) \times f(W) =$$

$$Y_T \times f(W),$$

(1)

式中: Y_w 为作物气候生产潜力, kg/hm^2 ; Q 为生育期太阳总辐射, MJ/m^2 ; $f(Q)$ 为光合修正系数; $f(T)$ 为温度修正系数; $f(W)$ 为水分修正系数; Y_Q 为光合生产潜力, kg/hm^2 ; Y_T 为光温生产潜力, kg/hm^2 。

1.3.1 光合生产潜力(Y_Q) 作物光合生产潜力指在温度、水分、品种、土壤及其他农业技术条件都适宜的条件下, 仅由自然辐射决定的单位面积产量水平。光合生产潜力被认为是粮食产量的理论上限, 是粮食生产潜力的最高层次。 Y_Q 的确定以月均太阳总辐射值为基本数据, 并用生育期对各月数据进行修正^[11-12], 其计算公式为:

$$Y_Q = Q \times f(Q) = \frac{C \times S \times \epsilon \times \Phi \times (1 - a) \times (1 - \beta) \times (1 - \rho)}{q \times (1 - \eta) \times (1 - \xi)} \times (1 - \gamma) \times (1 - \omega) \times f(L) \times E \times \sum Q_i,$$

(2)

式中: Y_Q 为单位面积光合生产潜力, kg/hm^2 ; C 为单位换算系数, 取值 10 000.05; Q_i 为生长季各月总辐射量, MJ/m^2 ; 其他参数意义及取值见表 1。

表 1 光合生产潜力计算公式中各参数的意义及取值^[13]
Table 1 Parameter and its value that are used to calculate the photosynthetic potential productivity

参 数 Parameter	物理意义 Physical significance	玉米 Maize
S	作物光合固定 CO ₂ 能力的比例 Proportion of the capability of carbon dioxide fixation	1.00
	光合辐射占总辐射的比例 Percentage of photosynthetically active radiation account for total radiation	
ε	光合作用量子效率 Photosynthesis quantum efficiency	0.42
Φ	植物群体反射率 Reflectivity of crop	0.224
a	植物繁茂群体透射率 Transmittivity of crop	0.08
β	非光合器官截获辐射比例 IPAR of the non-photosynthesis organs	0.06
ρ	超过光饱和点光的比例 Proportion of extra light saturation point	0.10
γ	呼吸消耗占光合产物的比例 Proportion of respiration photosynthetic product account for photosynthetic product	0.01
ω	作物叶面积动态变化修正值 Crop leaf area dynamic change corrected value	0.30
f(L)	作物经济系数 Crop economic coefficient	0.58
E	单位干物质含热量 (MJ/kg) Unite dry matter heat content	0.40
q	成熟谷物的含水率 Moisture content of ripened grain	17.20
η	植物无机灰分含量比例 Proportion of inorganic ash content	0.15
ξ		0.08

玉米的光合生产潜力是由玉米光饱和点、遮阴

率、太阳辐射在玉米叶片各层的分布、光能利用率等因素决定的^[11], 石羊河流域玉米播种时间为 5 月初, 收获时间为 9 月中旬, 生育期大约 135 d。

1.3.2 光温生产潜力 光温生产潜力是指水分、土壤、品种以及其他农业技术条件均处在适宜的条件下, 仅由自然光温条件决定的产量水平^[14], 其本质是光合生产潜力受到地区温度条件限制后的产量。其计算公式如下:

$$Y_T = Y_Q \times f(T),$$

(3)

式中: Y_T 为作物光温生产潜力, kg/hm^2 ; $f(T)$ 为温度修正系数, 其计算公式为^[14]:

$$f_1(T_i) = \begin{cases} 0 & T_i \leq 3 \text{ 或 } T_i \geq 25, \\ (T_i - 3)/15 & 3 < T_i \leq 18, \\ 1 & 18 < T_i \leq 21, \\ (25 - T_i)/4 & 21 < T_i < 25. \end{cases}$$

(4)

$$f_2(T_i) = \begin{cases} 0 & T_i \leq 8, \\ (T_i - 8)/15 & 8 < T_i < 23, \\ 1 & T_i \geq 23. \end{cases}$$

(5)

式中: $f_1(T_i)$ 为喜凉作物的温度修正系数, $f_2(T_i)$ 为喜温作物的温度修正系数, T_i 为月均温度($^{\circ}\text{C}$)。因为玉米为喜温作物, 故石羊河流域玉米温度修正系数按公式(5)计算。

1.3.3 气候(降水)生产潜力 在光温生产潜力基础上进一步进行水分修正, 得到的即是光温水生产潜力。如仅考虑自然条件下降水对作物生产的影响, 而忽略人为灌溉所补充的水分, 此时的光温水生产潜力又称为气候(降水)生产潜力, 其计算公式为^[14]:

$$Y_w = f(W) \times Y_T,$$

(6)

式中: Y_w 为作物气候生产潜力, kg/hm^2 ; $f(W)$ 为水分修正系数, 其计算公式为:

$$f(W) = \begin{cases} 1 - K_y(1 - P/ET_m) & P < ET_m, \\ 1 & P \geq ET_m. \end{cases}$$

(7)

式中: $f(W)$ 为水分修正系数; K_y 为缺水敏感系数; P 为作物生育期降水量, mm ; ET_m 为作物需水量, mm 。根据联合国粮农组织灌排手册第 56 卷^[15], 玉米生育期缺水敏感系数取 1.25。

1.4 专题图的制作

1.4.1 数据库的建立 根据作物气候生产潜力的研究需要, 在收集石羊河流域主要站点的气温、降水量、风速、日照时间、相对湿度等气象资料 and 主要作物的生长发育期及产量资料的基础上, 利用 ArcviewGIS 3.3 软件对各类数据进行一致性检验和处理, 包括类型一致性、精度一致性等, 使众多数据能够较好地匹配, 建立石羊河流域空间数据库、气候数

据库和作物数据库。

1.4.2 数据处理 建好数据库后,利用 GIS 技术对数据库进行空间数据与属性数据匹配连接和属性数据插值处理(主要是利用 ArcviewGIS 3.3 软件对石羊河流域地区各月的太阳辐射、温度、降水、日照等要素进行插值),然后根据上述公式计算作物的光合、光温和气候生产潜力,并将结果导入 Arcview-GIS 3.3,对石羊河流域空间数据进行赋值和匹配,最终得到石羊河流域玉米的光合、光温和气候生产潜力专题图。ArcviewGIS 3.3 用户界面见图 3。

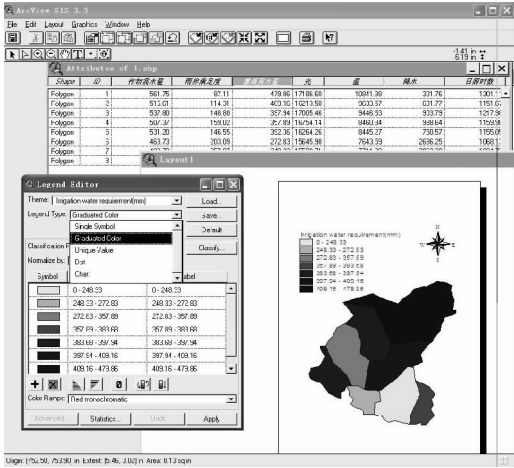


图 3 ArcviewGIS 3.3 的用户界面

Fig. 3 User interface of ArcviewGIS 3.3

1.5 CROPWAT 模型的计算原理

CROPWAT 模型是联合国粮农组织土地与水发展司开发的模型,其能帮助农业气象学家、农艺学家、灌溉工程人员对参考作物蒸发蒸腾量和作物蒸发蒸腾量进行标准的计算。此外,通过 CROPWAT 分析,能够建议如何改进灌溉方法、规划不同供水条件下的灌溉日程、评价雨养条件或非充分灌溉条件对作物产量的影响^[16]。

利用 CROPWAT 模型计算作物蒸发蒸腾量时,首先利用 Penman-Monteith 公式,结合当地的气象数据计算参考作物的蒸发蒸腾量,然后通过玉米各个生育阶段的作物系数得到玉米的实际蒸发蒸腾量^[17]。

1)参考作物蒸发蒸腾量。CROPWAT 模型是根据当地气象资料,利用 Penman-Monteith 公式计算参考作物的蒸发蒸腾量,其计算公式为^[17-18]:

$$ET_0 = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} \times u_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0.34u_2)},$$
 (8)

式中: ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量,mm/d; Δ 为饱和水气压与温度曲线的斜率,kPa/℃; R_n 为参考作物冠层表面净辐射,MJ/(m²·d); G 为土壤热通量,MJ/(m²·d); γ 为干湿表常数,kPa/℃; T_a 为 2 m 高处的日平均气温,℃; u_2 为 2 m 高处的风速,m/s; e_s 为饱和水气压,kPa; e_a 为实际水气压,kPa。

2)实际作物蒸发蒸腾量。模型通过参考作物蒸发蒸腾量和不同阶段的作物系数得到实际作物蒸发蒸腾量,其计算公式为^[18]:

$$ET_c = K_c \times ET_0,$$
 (9)

式中: ET_c 为作物蒸发蒸腾量,mm; K_c 为作物系数。根据 FAO 的作物 K_c 数据,玉米生育初期、中期、末期的 K_c 分别取 0.30,1.20 和 0.50^[15]。

2 石羊河流域玉米生产潜力的分析

2.1 光合生产潜力

利用公式(2)得到石羊河流域玉米光合生产潜力,结果(图 4)显示,石羊河流域玉米光合潜力为 22 704.79~25 732.44 kg/hm²,其中民勤地区最高,古浪地区最低,总体呈现由北向南逐渐降低的趋势。造成石羊河流域玉米光合生产潜力差异的原因,主要与代表光能资源的太阳辐射和日照时数的空间分布有关。例如,在石羊河流域北部民勤地区,玉米生育期的太阳总辐射和日照时数分别为 3 056.20 MJ/m² 和 1 336.23 h,而古浪地区玉米生育期太阳辐射和日照时数分别仅为 2 602.22 MJ/m² 和 1 014.96 h。

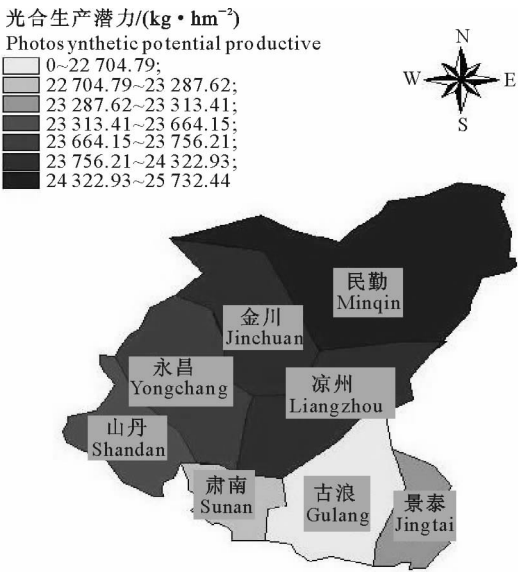


图 4 石羊河流域玉米的光合生产潜力

Fig. 4 Photosynthetic potential productivity of maize in Shiyang River Basin

2.2 光温生产潜力

根据公式(3),对石羊河流域玉米的光合潜力进行温度修正,得到光温生产潜力的空间分布,见图5。

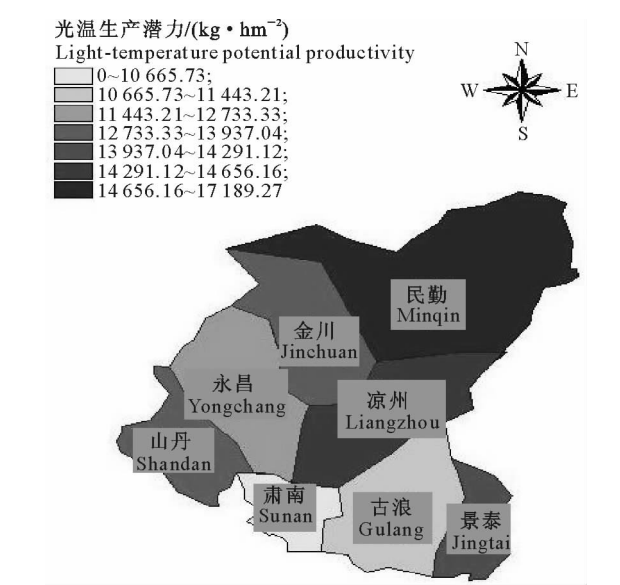


图 5 石羊河流域玉米的光温生产潜力
Fig. 5 Light-temperature potential productivity of maize in Shiyang River Basin

从图5可以看出,石羊河流域光温生产潜力最高值出现在民勤地区,为17 189.27 kg/hm²,最低值在肃南地区,为10 665.73 kg/hm²。由于光温生产潜力是在光合潜力的基础上进一步衰减的结果,所以光温生产潜力的分布规律与光合潜力大体一致,均表现为由北向南逐渐降低。但是由于各地作物生育期的温度满足作物生长要求的程度不同,温度修正系数存在差异(见表2),从而导致光温生产潜力出现了不同于光合潜力分布的区域。例如,民勤的月平均温度为20.03℃,而古浪、肃南地区玉米生育期平均温度只有15.13和13.76℃(表2)。所以,

表 2 石羊河流域玉米生产潜力各级修正参数

Table 2 The correcting coefficient of potential productivity in Shiyang River Basin				
地区 Area	生育期平均气温/℃ Mean temperature of growth period	温度修正系数 Temperature correcting coefficient	生育期降水量/mm Precipitation of growth period	水分修正系数 Moisture correcting coefficient
民勤 Minqin	20.03	0.668	83.68	0.021
金川 Jinchuan	17.20	0.573	115.20	0.070
凉州 Liangzhou	18.19	0.606	108.38	0.037
永昌 Yongchang	16.10	0.536	138.75	0.127
山丹 Shandan	17.53	0.584	123.87	0.081
景泰 Jingtai	18.41	0.613	127.01	0.088
肃南 Sunan	13.76	0.458	180.13	0.318
古浪 Gulang	15.13	0.504	211.89	0.345

降水生产潜力反映了自然条件下农业生产可能达到的理论最高水平。由于甘肃省绝大多数地区属

肃南光合潜力虽然并不是最低,但是由于生育期温度较低,导致其光温生产潜力成为流域最低值。由此可见,作物生育期内的温度条件对于作物生长和产量的形成具有重要影响。

2.3 气候(降水)生产潜力

利用水分修正系数对玉米光温生产潜力作进一步修正,可得到玉米气候(降水)生产潜力。由图6可以看出,石羊河流域的玉米气候(降水)生产潜力相对较低,最高值出现在古浪地区,为3 947.91 kg/hm²;最低值出现在民勤地区,为360.97 kg/hm²。石羊河流域玉米气候(降水)生产潜力空间分布规律与光合、光温生产潜力相反,其从北向南逐渐增大(见图6),这主要是因为玉米生育期降水量由北而南逐渐增加,从而使水分修正系数 $f(W)$ 由北向南增大引起的,见表2。

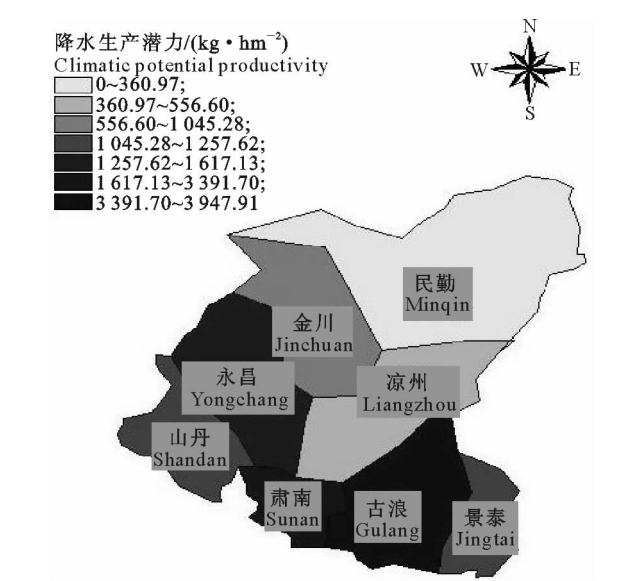


图 6 石羊河流域玉米的气候(降水)生产潜力
Fig. 6 Climatic(precipitation) potential productivity of maize in Shiyang River Basin

于干旱、半干旱气候区,降水是自然条件下农业生产的最主要限制因子^[10],所以石羊河流域玉米气候

(降水)生产潜力很低。因此,为了使石羊河流域的光、热资源得到充分利用,需要对石羊河流域作物进行灌溉,使作物产量尽量接近光温生产潜力,即作物达到水分不受自然界供应条件限制时的产量上限^[6]。

2.4 玉米灌水量需求分析

光合、光温生产潜力是由太阳辐射、温度等气象条件决定的,因而很难人为地加以改变,只有水分条件可以通过灌溉进行解决。针对石羊河流域玉米降水生产潜力普遍较低的现状,利用 FAO 的 CROPWAT 模型分析了石羊河流域的玉米生育期需水规律,以为玉米灌溉提供依据,增加玉米产量,使石羊河流域光、热资源得到有效利用。

利用公式(9)计算出玉米各生育阶段的蒸发蒸腾量,结果见图 7。从图 7 可以看出,石羊河流域玉米蒸发蒸腾量高峰期出现在 6 月下旬至 7 月下旬,即在拔节-抽穗阶段,其峰值出现在 7 月上旬,民勤最高,为 63.78 mm,金川 53.92 mm,凉州 53.32 mm,永昌 52.35 mm,山丹 55.70 mm,景泰 53.47

mm,肃南 44.17 mm,古浪 54.67 mm。拔节-抽穗阶段是玉米产量形成的关键时期,拔节期缺水会导致植株矮化、穗位高降低,从而使产量下降。抽穗期是玉米的水分临界期,干旱可导致散粉至吐丝期间隔加大,致使花期不遇(母本吐丝与父本抽雄散粉相遇不良或不能相遇,造成结实率低,甚至制种失败),穗粒数大幅度下降,从而严重影响玉米的产量^[19]。由图 7 可知,石羊河流域玉米抽穗期需水强度最高,说明该期春玉米对水分需求强烈,是需水的敏感期,满足该阶段春玉米对水分的需求,对其高产、稳产十分重要。因此,石羊河流域这段时间的玉米灌溉用水应该得到保证。

由于石羊河流域年际间的气象条件变化较大,例如古浪地区 2001 年降水量为 338 mm,而 2002 年为 410.2 mm,变幅为 17%,这就要求灌溉部门在考虑年内玉米需水量变化的同时,也要考虑气象条件的年际变化对于灌溉的影响,在灌溉规划过程中,根据不同的水文年份,选择设计典型年,进行灌溉需水量分析和灌溉制度的制定,以保障灌溉需求。

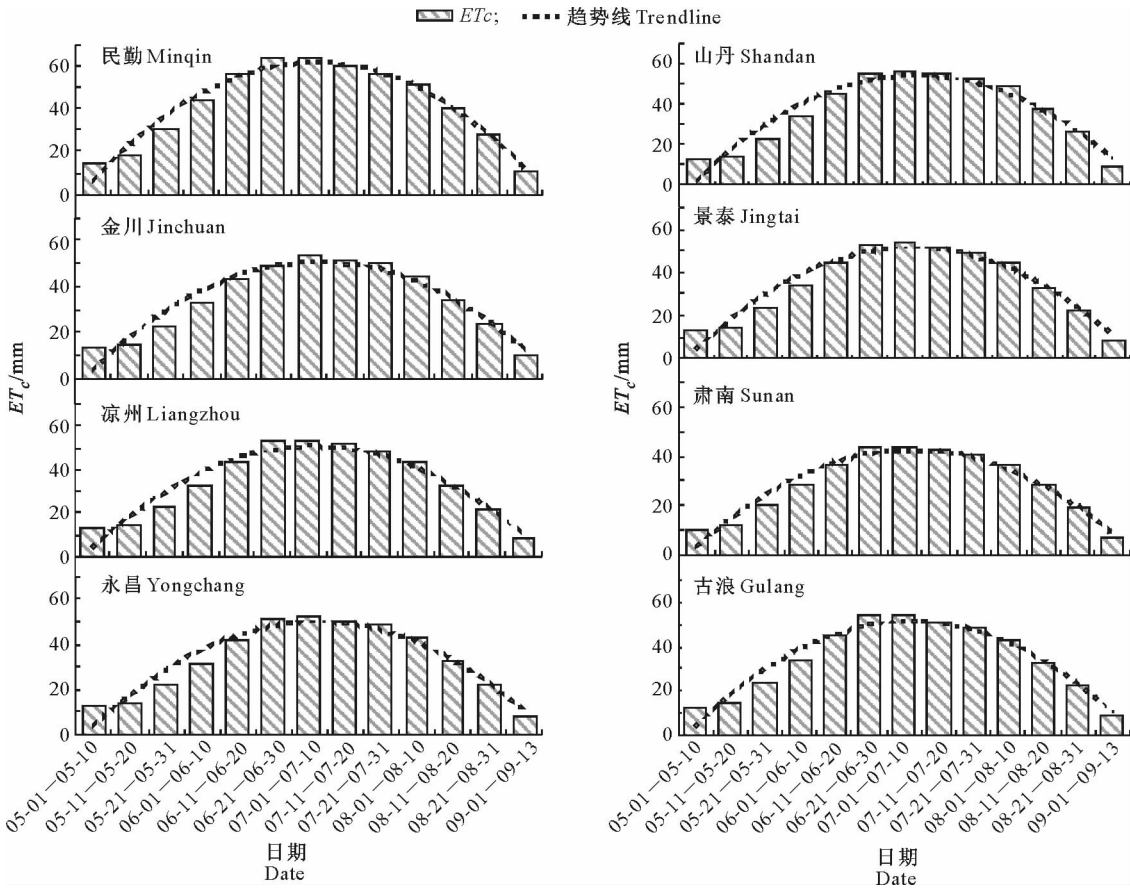


图 7 石羊河流域玉米生育期蒸发蒸腾量
Fig. 7 Evapotranspiration during the maize growth period in Shiyang River Basin

3 结论与讨论

作物生产潜力的研究主要有经验法和机制法^[20],与经验法相比,机制法的优点是机理性强、逻辑思维严密^[21],其通过对不同层次作物生产潜力以及限制因子的计算,有助于分析当地气候对农业生产的影响,找出影响产量形成的因素,从而有针对性地寻求克服的方法和途径。该方法的关键问题是如何正确地给出与当地农业生产过程相符合的各层次的修正系数^[10]。但在以往的研究中,各级修正系数的确定无论在指标的设定还是研究尺度上都较为粗略,多用无霜期的比例、气候湿润度等指标表示温度和水分修正系数^[10],过为粗略的修正系数使潜力值偏差较大,不能真正地反映作物实际生长过程中潜力的衰减过程。同时,研究的尺度也多处于省级或大区层次上^[22],对于石羊河流域这样区县级小尺度的研究还较少。鉴于此,本研究采用流域玉米生育期月均气象数据(而不是用无霜期的比例、气候湿润度粗略地估算温度和水分修正系数),利用公式(5)和(7)分别计算了温度、水分修正系数,并采取逐级修正的方法,对石羊河流域玉米气候生产潜力进行了研究,推求了流域玉米光合、光温、气候(降水)生产潜力,使结果更加接近当地实际。同时,本研究利用 ArcviewGIS 3.3 软件对空间、属性条件进行统计,然后建立空间和属性数据库,进而实现 GIS 的空间查询功能,如要查询玉米光合生产潜力大于 $2.4 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ 的地区,只需激活玉米光合生产潜力专题的属性表,在“Query Builder”选项中输入查询条件,即可获得相应的查询结果。同时,利用 GIS 的可视化表达与输出功能,对各种空间关系进行分析,将分析结果以图文一体化的报表方式输出,制作多种样式的专题图,如图 4~6 所示的各种生产潜力专题图,能让结果更加直观,进而为管理决策提供参考。本研究还将 CROPWAT 模型引入发掘流域玉米生产潜力的对策研究中,根据对石羊河流域玉米生育期需水量的分析,提出相应的灌溉决策,以降低水分对流域玉米产量的限制。

本研究所得到的结论如下:

1)采用机制法计算了石羊河流域玉米光合、光温、气候(降水)生产潜力,利用 GIS 技术制作玉米生产潜力专题图并分析其空间变化规律。结果显示,石羊河流域玉米光合、光温生产潜力大体呈现北高南低的空间分布规律,而降水生产潜力呈现出北低南高的分布规律。其中光合生产潜力为

22 704.79~25 732.44 kg/hm^2 ,属于中国光合生产潜力中值地区;玉米光温生产潜力为 10 665.73~17 189.27 kg/hm^2 ,处于西北四等光温生产潜力区^[17];玉米气候(降水)生产潜力为 360.97~3 947.91 kg/hm^2 ,在全国处于较低水平。由此可见,石羊河流域有着较好的太阳辐射资源,限制玉米生产潜力的主要因素是水分因素,如果没有灌溉条件,仅依靠降水,石羊河流域的很多地区,如民勤、凉州等地的作物产量会大幅降低。

2)通过 CROPWAT 模型,分析石羊河流域玉米生育期需水量变化规律,发现玉米蒸发蒸腾量的高峰期出现在 6 月下旬至 7 月下旬,即在拔节-抽穗阶段,由于该生育期也是玉米产量形成的关键时期,所以应该满足玉米此时期的灌溉用水,从而有效地发挥石羊河流域的光、热资源,增加玉米现实产量。

3)机制法计算作物生产潜力的优点是,机理性强、逻辑思维严密,但其主要问题是计算过程中各项参数及修正系数的确定都较为粗略,例如,在计算光合生产潜力时,表 1 中关于玉米的各项参数也没有建立起不同地区、不同品种的具体取值范围,这就有可能导致计算结果偏差较大。因此,如何根据研究地区实际,科学地确定各层次生产潜力的主要限制因子的有效程度^[22],以及如何建立不同尺度、不同作物的生产潜力计算体系,使计算结果更接近实际,还需要进行进一步研究。

[参考文献]

- [1] 马全林,孙 坤,王继和.石羊河流域的生态环境问题、引发原因与治理对策[J].安全与环境学报,2004,4(5):64-68.
Ma Q L, Sun K, Wang J H. Environment problem with Shiyang River Basin, its root-causes and rehabilitation measures [J]. Journal of Safety and Environment, 2004, 4(5): 64-68. (in Chinese)
- [2] 信乃谔,王立祥.中国北方旱区农业[M].南京:江苏科学技术出版社,1998:150-164.
Xin N Q, Wang L X. Arid agriculture in North China [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1998: 150-164. (in Chinese)
- [3] 谷冬艳,刘建国,杨忠渠,等.作物生产潜力模型研究进展[J].干旱地区农业研究,2005,25(5):89-95.
Gu D Y, Liu J G, Yang Z Q, et al. Reviews on crop productivity potential researches [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 25(5): 89-95. (in Chinese)
- [4] Loomis R S, Williams W A. Maximum crop productivity: An estimate [J]. Crop Science, 1963, 3(1): 67-72.
- [5] 李三爱,居 辉,池宝亮.作物生产潜力研究进展[J].中国农业气象,2005,26(2):106-111.

Li S A,Ju H,Chi B L. Reviews on crop potential productivity researches [J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2005,26(2):106-111. (in Chinese)

[6] 冷石林. 开发北方旱农地区自然降水生产潜力的主要限制因素及途径 [J]. 中国农业气象,1997,18(1):13-17.

Leng S L. The major limiting factors and methods to develop the precipitation production potential in northern arid agricultural zone [J]. Chinese Journal of Agrometeorology,1997,18(1):13-17. (in Chinese)

[7] James W H,James W J,Sivakumar M V K,et al. Climate prediction and agriculture [C]. Washington DC, USA:International START Secretariat,2000:77-117.

[8] 周治国,孟亚利,曹卫星. 基于知识模型和 GIS 的作物生产潜力评价 [J]. 中国农业科学,2005,38(6):1142-1147.

Zhou Z G,Meng Y L,Cao W X. Knowledge model and GIS-based crop potential productivity evaluation [J]. Scientia Agricultura Sinica,2005,38(6):1142-1147. (in Chinese)

[9] 甘肃省水利厅. 石羊河流域重点治理规划 [R]. 兰州:甘肃省水利厅,甘肃省发展和改革委员会,2007.

Water Resources Department of Gansu Province. The Shiyang River Basin management Planning [R]. Lanzhou: Water Resources Department, Development and Reform Commission of Gansu,2007. (in Chinese)

[10] 郑海霞,封志明,游松才. 基于 GIS 的甘肃省农业生产潜力研究 [J]. 地理科学进展,2003,22(4):400-408.

Zheng H X,Feng Z M,You S C. A study on potential land productivity based on GIS technology in Gansu province [J]. Progress in Geography,2003,22(4):400-408. (in Chinese)

[11] 封志明. 资源科学导论 [M]. 北京:科学出版社,2004.

Feng Z M. Resources science [M]. Beijing: Science Press,2004. (in Chinese)

[12] 姚玉璧,朱国庆,李巧珍,等. 陇中高寒阴湿区蚕豆气候区划 [J]. 中国农业气象,2002,23(2):27-31.

Yao Y B,Zhu G Q,Li Q Z,et al. A study of climatic classification for broad bean in the middle Gansu Province [J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2002,23(2):27-31. (in Chinese)

[13] 王宗明,张 柏,张树清,等. 松嫩平原农业气候生产潜力及自然资源利用率研究 [J]. 中国农业气象,2005,26(1):1-6.

Wang Z M,Zhang B,Zhang S Q,et al. Studies on agricultural climatic potential productivity and natural resources utilization ratio in Songnen plain of Heilongjiang Province [J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2005,26(1):1-6. (in Chinese)

[14] 曹卫星. 作物栽培学总论 [M]. 北京:科学出版社,2006:160-162.

Cao W X. Crop cultivation [M]. Beijing: Science Press,2006:160-162. (in Chinese).

[15] Allen R G,Raes D. FAO irrigation and drainage paper No. 56 [M]. Rome:FAO,1998:181-182.

[16] Smith M,Clarke D. CROPWAT for windows: User guide [M]. Rome:FAO,1998:22-23.

[17] Feng Z M,Liu D W. Water requirements and irrigation scheduling of spring maize using GIS and CROPWAT model in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Chinese Geographical Science,2007,17(1):56-63.

[18] Kang S. Simulation of winter wheat evapotranspiration in Texas and Henan using three models of differing complexity [J]. Agricultural Water Management,2008(6):1-12.

[19] 白向历,孙世贤,杨国航,等. 不同生育时期水分胁迫对玉米产量及生长发育的影响 [J]. 玉米科学,2009,17(2):60-63.

Bai X L,Sun S X,Yang G H,et al. Effect of water stress on maize yield during different growing stages [J]. Journal of Maize Sciences,2009,17(2):60-63. (in Chinese)

[20] 黄秉维. 中国农业生产潜力——地理集刊 [M]. 北京:科学出版社,1985:15-22.

Huang B W. China agricultural potential productivity——Geographic collection [M]. Beijing: Science Press,1985:15-22. (in Chinese)

[21] 刘新卫,陈百明. 黄土丘陵区安塞县县域粮食生产潜力及其开发 [J]. 农业工程学报,2004,20(6):286-290.

Liu X W,Chen B M. Potential grain productivity and its exploitation of a county in Loess hilly-gully region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2004,20(6):286-290. (in Chinese)

[22] 党安荣,阎守邕. 地理信息系统支持下的中国粮食生产潜力研究 [J]. 遥感学报,1999,3(3):225-229.

Dang A R,Yan S Y. Study of China grain production potential based on GIS [J]. Journal of Remote Sensing,1999,3(3):225-229. (in Chinese)

(上接第 210 页)

[16] 张洪波,黄 强,辛 琛,等. 水资源承载力可拓评价方法 [J]. 大连理工大学学报,2006,46(S1):206-212.

Zhang H B,Huang Q,Xin C,et al. Study of extension evaluation method for water resources carrying capacity [J]. Journal of Dalian University of Technology,2006,46(S1):206-212. (in Chinese)

[17] 苗得强. 基于模糊综合评判方法的县域水资源承载力分析 [D]. 郑州:华北水利水电学院,2009.

Miao D Q. Based on the fuzzy comprehensive evaluation method of county water resources carrying capacity analysis [D]. Zhengzhou: North China University of Water Conservancy and Hydroelectric Power,2009. (in Chinese)