

文章编号: 1007-6301 (2003) 04-0400-11

基于 GIS 的甘肃省农业生产潜力研究

郑海霞, 封志明, 游松财

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要: 在气象数据库、属性数据库和 GIS 支持下, 采用机制法对作物生产潜力模型进行了光、温、水、土逐级订正, 得到了甘肃省的光合、光温、降水、水资源及土地的生产潜力, 其结果很好的反映了甘肃省农业生产和农业资源分布的空间格局, 各级订正的有效系数进一步揭示了各种资源因子对农业生产的限制程度。

关 键 词: 农业生产潜力; 资源限制因子; 资源因子系数; 甘肃省

中图分类号: F303.4

随着人地关系的紧张, 粮食问题再度成为全球性重大问题之一。自 20 世纪 30 年代以来, 许多学者从不同层次、不同角度对农业生产潜力开展了大量的研究工作^[1~15], 研究方法主要包括两大类: 经验法和机制法^[12, 14, 16]。由于机制法机理性强、逻辑思维严密而逐渐被人们所接受。机制法以瓦赫宁根模型和农业生态区模型为代表, 在国内多以黄秉维^[12]提出的农业生产衰减模型作为主要方法, 它是依据作物生产力形成的机理, 考虑光、温、水、土等自然生态因子及施肥、灌溉、耕作、育种等农业技术因子, 根据作物能量转化及粮食产量形成过程, 逐步“衰减”来估算农业生产潜力。该方法的关键问题是如何正确的给出与当地农业生产过程相符合的各层次有效系数。目前关于各级有效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订正系数, 土壤有效系数也多处于探讨阶段, 过粗的订正系数使潜力值偏大, 没有真正反映作物实际生长过程中潜力的衰减过程; 研究的尺度也多处于省级或大区层次上, 最为详尽的是处于县域层次上的研究^[17, 18]。基于此, 本研究利用月均农业气象数据、数字高程模型 (DEM) 数据、农业详查及统计数据, 利用逐级订正的方法, 建立了包括光、温、水、土的农业生产潜力模型和有效系数模型, 并以甘肃省为例进行了案例研究。

1 农业生产潜力研究方法与模型

与传统方法不同, 本研究涉及到气象数据、作物类型、地形、土壤以及耕地等数据的

收稿日期: 2003-05; 修订日期: 2003-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70173023) 及中国科学院地理科学与资源研究所知识创新领域前沿项目 (CXDG-A 00-04)

作者简介: 郑海霞 (1975-), 女, 中国科学院地理科学与资源研究所博士生, 主要研究方向为资源持续利用、区域综合开发。E-mail: hxzheng@igsnrr.ac.cn

融合方法和农业生产潜力的逐级建模, 研究的工作流程复杂 (图 1)。

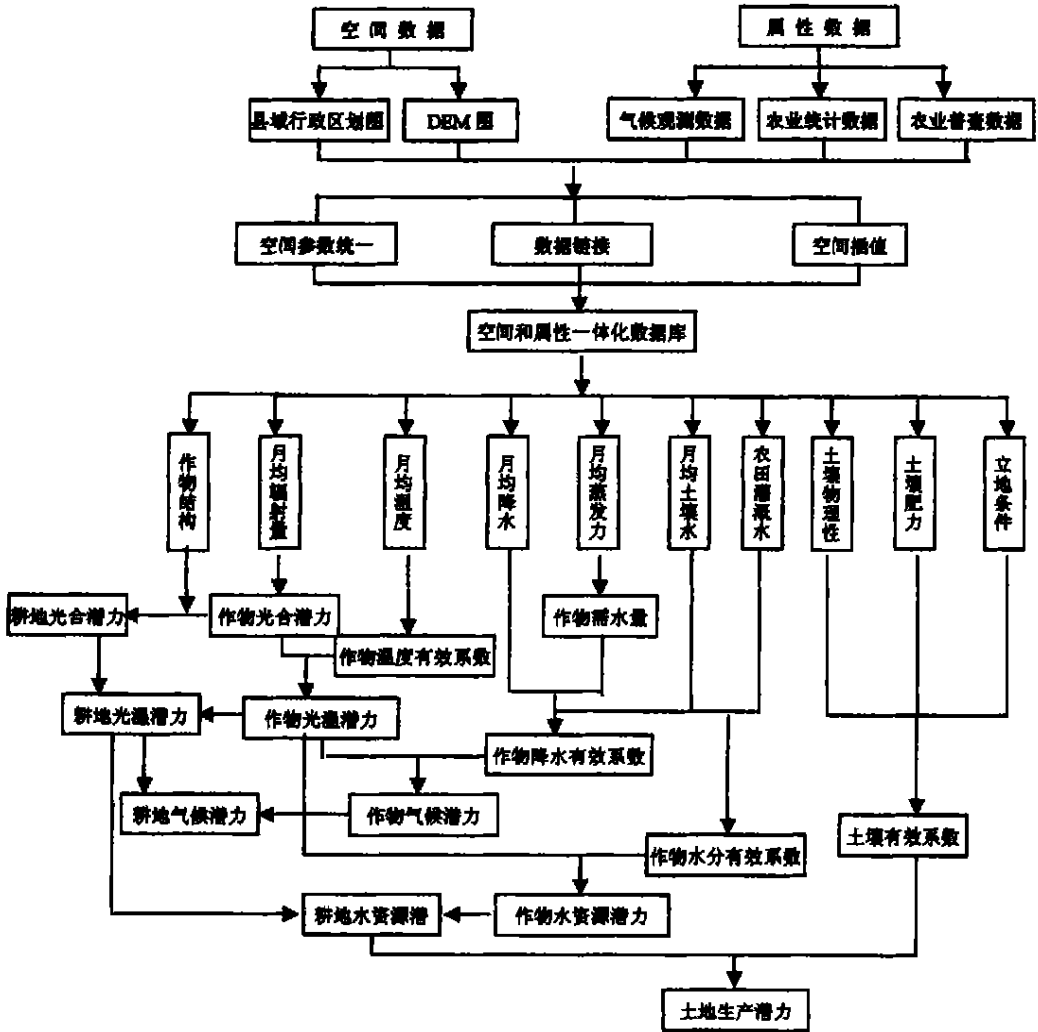


图 1 土地生产潜力计算技术路线图

Fig. 1 Flow chart of potential land productivity calculation

1.1 建立数据库

在月均气候资料的基础上, 建立尺度统一、相互融合的数据库是十分重要的。本研究建立的数据库有空间数据库和属性数据库, 空间数据库包括县域行政区划图、DEM 图等, 属性数据库包括气象数据库、土壤详查数据库、土地详查数据库以及农业统计数据库等。气象数据库经过空间插值和数据处理形成了与空间数据库相匹配的栅格图。同样, 土壤和土地详查数据在一定的评分标准下, 运用层次分析法得到土地有效系数, 并与县域行政区划空间数据相链接形成县域空间数据^[18, 19]。

1.2 研究方法与估算模型

通过对农业生产过程的系统分析, 首先把作物生产力逐步衰减模型与 ARC/NFO 空

间分析中网格建模相结合^[20]。为了使农业生产潜力与实际生产力相符合,把作物生产潜力集成土地生产潜力,即首先利用研究区域3年平均作物播种结构数据计算出主要代表作物的生产潜力,再利用作物结构比例为权重订正作物潜力得到一年一熟情形下的土地生产潜力。作物生产力衰减模型主要包括:光合生产潜力、光温订正、光温降水订正、水分订正和土地订正等模型。具体估算模型如下:

(1) 作物光合生产潜力

作物光合生产潜力的计算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订正,估算公式为:

$$P_f = \sum_{i=1}^n 0.219 \cdot Q_i \cdot LGP_i / M_i \quad (1)$$

式中 Q_i 为作物生育期内各月太阳总辐射值 (单位: J/cm^2), LGP_i 为 i 月所处生育期内的天数, P_f 为作物光合生产潜力 (单位: kg/hm^2), i 为生育期内的月数, M_i 为 i 月的天数。

(2) 作物温度有效系数与光温潜力

温度衰减过程的订正是利用月均温度分段进行订正的,根据作物的生物学特性的不同(喜凉作物和喜温作物),采用不同的订正模型,方法如下:

$$f_1(T_i) = \begin{cases} 0 & T_i \leq 3 \text{ 或 } T_i \geq 25 \\ (T_i - 3)/15 & 3 < T_i < 18 \\ 1 & 18 \leq T_i \leq 21 \\ (25 - T_i)/4 & 21 < T_i < 25 \end{cases} \quad (2)$$

$$f_2(T_i) = \begin{cases} 0 & T_i \leq 8 \\ (T_i - 8)/15 & 8 < T_i < 23 \\ 1 & T_i \geq 23 \end{cases} \quad (3)$$

$$P_t = \sum_{i=1}^n 0.219 \cdot Q_i \cdot f_i(T_i) \quad (4)$$

式中 $f_1(T_i)$ 、 $f_2(T_i)$ 、 P_t 分别为喜凉作物、喜温作物有效系数和光温潜力模型, T_i 为月均温度。

(3) 作物降水有效系数与降水潜力

降水主要是通过生育期降水和作物需水量的对比并结合作物产量反应系数来订正的,降水有效系数与降水潜力模型分别为:

$$f(P) = \begin{cases} 1 - K_y(1 - P/ET_m) & P < ET_m \\ 1 & P \geq ET_m \end{cases} \quad (5)$$

$$P_p = f(P) \cdot \sum_{i=1}^n 0.219 \cdot Q_i \cdot f_i(T_i) \quad (6)$$

式中 P 、 ET_m 分别为作物生育期降水量和需水量, K_y 为产量反应系数, $f(P)$ 为作物的降水有效系数, P_p 为降水潜力。

(4) 作物水分有效系数与水资源潜力

计算水分有效系数的关键步骤是作物实际耗水量 ET_a 的计算,作物耗水的来源包括降

水、灌溉水、土壤水、地表径流、潜水蒸发等, 本研究采用农田水分平衡法计算 ET_a , 农田水分平衡公式为:

$$W = P + I - G - R_v - D_p - ET_a \quad (7)$$

式中 W 为计算期初和期末土壤水的变化量, P 、 I 分别为降水和灌溉水量, G 、 D_p 、 R_v 分别为地下水上升补给量、土壤深层渗漏量和地表径流量。由于本研究是基于区域层次上的研究, 地表径流量 R_v 可以忽略不计, 地下水上升补给量和土壤深层渗漏量是两个相反作用的过程, 在此也忽略不计, 由此得出作物实际耗水量和水分有效系数估算模型为:

$$ET_a = \begin{cases} P + I - W & P + I - W < ET_m \\ ET_m & P + I - W > ET_m \end{cases} \quad (8)$$

$$f(I) = 1 - K_v(1 - ET_a/ET_m) \quad (9)$$

式中 $f(I)$ 为生育期灌溉有效系数, I 表示单位耕地面积上灌溉水资源量, 其它同上式, 所有表示水资源的指标的单位都统一为毫米。相对应的灌溉条件下的作物生产潜力模型为:

$$P_I = f(I) \cdot \prod_{i=1}^n 0.219 \cdot Q_i \cdot f_i(T_i) \quad (10)$$

(5) 作物土地有效系数与土地潜力

对作物土地生产潜力的有效系数主要考虑了土壤的物理、化学性状和立地条件三个方面, 相对应地选择了土壤质地、有机质含量、速效氮、速效磷、速效钾、pH 值、侵蚀度和地形坡度 8 个指标, 土地有效系数估算公式如下:

$$f(s) = \prod_{i=1}^n W_i \cdot A_i \quad (11)$$

式中 W_i 为各指标得分, A_i 为权重, 利用层次分析方法得到。相对应的土地生产潜力模型为:

$$P_s = P_I \cdot f(s) \quad (12)$$

(6) 作物结构订正与区域农业生产潜力

区域农业生产潜力是在作物生产潜力的基础上利用作物结构进行订正而得到的, 订正公式如下:

$$Y_f = \prod_{j=1}^n P_j \cdot R_j / \prod_{j=1}^n R_j \quad (13)$$

式中 Y_f 为区域农业生产潜力, P_i 为作物生产潜力, R_i 为作物种植比例, i 为作物种类个数。

2 甘肃省农业生产潜力及衰减空间变化分析

2.1 光合潜力分析

根据上述方法首先对甘肃省作物种植结构进行分析, 以种植面积比例之和大于 70% 为界限, 选择了甘肃省主要作物类型: 小麦, 玉米和马铃薯, 小麦又分冬小麦和春小麦。利用光合生产潜力模型进行运算得到 4 种主要作物的光合潜力, 再把作物的光合生产潜力以种植比例按公式 13 进行加权叠加得到耕地的光合生产潜力 (图版 I, 图 2)。可以看出, 甘肃省作物光合潜力的变化主要与太阳辐射空间分布有关, 并非完全一致。在河西西部和陇东、陇南形成两个高值区, 陇中和甘南地区形成了低值区, 表现为从山区向谷地递减, 安

敦盆地小于处于北山和祁连山区的肃北、阿克塞等区域,另一太阳辐射高值区金昌、民乐地区也形成了光合潜力的高值区。作物生育期的影响主要表现在陇东、陇南太阳辐射量较小的地区也形成光合潜力的高值区,尤其陇南是研究区太阳辐射量最小的地区。由于在区域层次上只有生育期内的光能资源才对光合潜力的形成具有实际意义,作物生育期的长短对光合潜力的大小具有重要意义。本研究所应用的作物生育期是物候意义上的,它是利用实测的气象资料、作物生长界限温度资料和研究区作物生长所需积温等计算得来的。处于甘南州的玛曲县由于特殊的气候条件实际没有作物种植,所以没有进行光合潜力的计算(下同)。

2.2 光温潜力及光温衰减分析

对光温生产潜力分喜凉作物和喜温作物进行订正的,利用公式(2)~(4)得到作物光温潜力,并利用公式(13)进行作物结构订正,得到耕地光温生产潜力(图版 I,图 3a)。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,其大体趋势与光合潜力一致,表现为河西地区高于陇南和甘南,相同纬度地区大体上东部高于西部。值得注意的是陇南光温潜力并不高,这主要是由于陇南的温度并不是很高,也是甘肃省太阳辐射最低的地区,而温度和太阳辐射最高的地区都集中在河西地区,所以河西地区成为甘肃省光温潜力的高值区,其值大约为: $45000 \sim 61000 \text{ kg/hm}^2$ 。陇东的光温潜力也较高,大约处于 $45000 \sim 55000 \text{ kg/hm}^2$,这主要是由于陇东作物生育期内太阳辐射和温度都较高共同影响的结果。从作物温度有效系数更能清晰的看出作物温度衰减的空间变化和喜凉、喜温作物温度衰减的差异,图版 I 中图 3b 和图 3c 分别表示 7 月份喜凉和喜温作物的温度有效系数,可以看出喜凉作物在陇中地区和河西山区温度有效系数较高,大约为 0.9~1.0,而在河西川区很小,在安西、敦煌地区形成最低值,只有 0~0.2 左右,喜温作物的最高值则出现在河西川区、陇南东部和陇东南部地区,有效系数达到 0.9 以上,陇中地区、祁连山区和甘南是喜凉作物温度有效系数的低值区,大约处于 0~0.4 的水平。

2.3 气候潜力及降水衰减分析

利用自然降水对作物生产进行订正得到没有人工投入影响的气候生产潜力(图版 I,图 4a),气候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,所以甘肃省气候生产潜力很低,河西地区除祁连山区南部处于 $3000 \sim 6000 \text{ kg/hm}^2$ 以外,其余都处于 3000 kg/hm^2 以下,西北部的酒泉、嘉峪关等地区接近于 0,在陇东、陇南和甘南地区气候潜力较大,处于 $15000 \sim 30000 \text{ kg/hm}^2$ 之间。降水有效系数也反映了同样的趋势(图版 I,图 4b),在河西的绝大多数地区,小麦和玉米的降水有效系数都处于 0~0.1 之间(玉米图略)。最大值在甘南地区达到 0.8~1.0,陇东和陇南其次,为 0.6~0.8,这是因为降水有效系数除受生育期降水量的影响外,还受作物蒸发力的影响,甘南蒸发力为全省最小。另外,需要指出的是,由于河西地区农业生产主要靠灌溉维持,气候生产潜力对这些地区实际意义不大。

2.4 农业水资源利用潜力及水分衰减分析

由于作物实际生长过程中对水分的吸收和利用包括了降水、灌溉水、土壤水和地下水等,只有综合考虑这些因子进行农业水资源利用潜力的计算才能真正反映出区域水资源利用的实际潜力水平,这对于拥有典型灌溉区和雨养农业区的甘肃省尤为重要。因此,应用

本研究建立的综合考虑降水、灌溉水、土壤水的水分有效系数和水资源潜力模型, 得出了甘肃省农业水资源利用潜力以及水分有效系数(图版 II, 图 5a、图 5b)。可以看出甘肃省水资源潜力河西地区较高, 并在肃北、阿克塞、临泽和民乐等小地域内成了最高值, 达到了 45000~ 60000kg/hm²。

另外, 在黄河沿岸的兰州市和白银市也形成了次高值区, 祁连山区和陇中形成了低值区, 潜力值为 10000~ 25000kg/hm², 这除了光温潜力的基础外, 水分有效性也起了重要的作用, 尤其是水资源潜力在相互独立的区域内形成高值点, 表明了灌溉所起的关键性作用, 同时也显示出水资源在区域间分配的不平衡。以小麦水分有效系数为例(图版 II, 图 5b), 可以看出内流河灌溉区和黄灌区水分有效系数较高, 达到了 0.9~ 1.0 的水平。另外, 把图版 II, 图 5 中水分有效系数与图版 I, 图 4 中的降水有效系数进行对比, 可以清楚的发现灌溉在甘肃省农业资源利用中的主导作用: 在整个河西地区降水有效系数几乎为 0, 而水分有效系数则达到了 0.9~ 1.0 的水平, 同样属于河西灌溉区的山丹县由于灌溉水不足而使水分有效系数很小, 只有 0.1~ 0.5 左右。灌溉区水分有效系数接近于 1 同时也反应了这些地区大水漫灌和水资源浪费严重的问题。

2.5 土地潜力及土地衰减分析

由于影响土地衰减的因子比较复杂, 本研究首先选取了 8 项指标评价土地有效系数, 利用层次分析法构造因子重要性判断矩阵, 得到各因子的重要性权重系数(表 1); 然后根据各因子在作物生长发育及产量形成中的作用, 并参考全国土壤因子评价标准, 确定各因子的等级和评分标准(表 1)。

表 1 土地有效系数评价指标标准及其权重

Tab. 1 Criterion and weighting coefficient of evaluation indexes on land effective coefficient										
理化性状	权重系数	指标	指标得分标准							
有机质 (%)	0.217	含量	O < 1.0	1.0	O < 1.5	1.5	O < 2.5	2.5	O < 3.5	O 3.5
		得分	0.2		0.4		0.6		0.8	1
速效氮 (ppm)	0.133	含量	N < 30	30	N < 60	60	N < 100	100	N < 150	N 150
		得分	0.2		0.4		0.6		0.8	1
速效磷 (ppm)	0.108	含量	P < 5	5	P < 10	10	P < 15	15	P < 20	P 20
		得分	0.2		0.4		0.6		0.8	1
速效钾 (ppm)	0.093	含量	K < 50	50	K < 70	70	K < 100	100	K < 150	K 150
		得分	0.2		0.4		0.6		0.8	1
pH 值	0.074	范围	pH 8.5	8	pH < 8.5	7.5 < pH < 8	6.5	pH 7.5		
		得分	0.2		0.5		0.7		1	
土壤质地	0.125	类型	紧砂土		轻粘土		砂壤土		轻壤土	中壤土、壤土
		得分	0.3		0.4		0.8		0.9	1
侵蚀度 (%)	0.125	侵蚀比率	E 0.8	0.6	E < 0.8	0.4	E < 0.6	0.2	E < 0.4	E < 0.2
		得分	0.2		0.4		0.6		0.8	1
地形 (度)	0.125	坡度	P 2	2 < P	6	6 < P	15	15 < P	25	P > 25
		得分	1		0.9		0.8		0.6	0.4

依据评分标准得到各县、市的指标得分,用权重系数加权得到各县、市的土地有效系数(图版 II,图 6b),利用公式(12)得到土地潜力(图版 II,图 6a)。由于资料的限制对土地衰减的估算是县域层次上,土地有效系数在县域范围内相同。可以看出,土地有效系数整体上是河西和甘南地区较高,多数地区达到了 0.65~0.80,整个黄土高原地区都较低,以陇东和陇南东部地区最低,多数地区在 0.42~0.55 之间,这与当地的农业投入水平和小区域地形地貌、土壤理化性质密切相关。经过几次订正,甘肃省土地潜力的空间分布格局更为明显,总体上看,河西地区较高,最高达到了 30000~40000 kg/hm² 左右,陇东、陇南和甘南较低,多数地区处于 8000~15000 kg/hm²。同一地区多是川区高于山区,祁连山区形成最低值,土地潜力在 8000 kg/hm² 以下。

为了分析土地潜力与实际粮食产量的关系,验证土地潜力估算的精度,本研究利用甘肃省 81 个县 1999~2001 年 3 年平均粮食单产与土地潜力作双轴曲线进行对比(图 7),发现二者走势大体一致,具有一定的相关性,对二者进行相关分析,相关系数为 0.696,这表明粮食产量除了受当地自然潜力水平的影响外,还受区域管理条件等的影响。

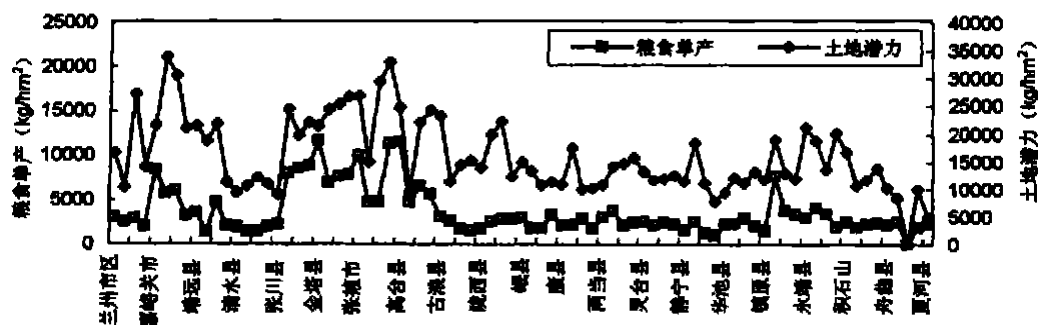


图 7 各县市粮食单产与土地潜力的对比分析

Fig. 7 Contrast between grain production per hm² and potential land productivity in county unit

用粮食单产与土地潜力的比值进一步分析土地潜力的实现程度,结果显示单产-潜力比值在河西地区和临夏州的部分地区较大,并且相同地区范围内也存在着较大的差异,这与相关性分析和土地潜力空间分析的结果相一致。对其进行分级统计,结果表明单产-潜力比率在 0.2 以下的县市 45 个,占 55.6%,0.2~0.4 的 29 个,占 35.8%,0.4~0.5 的占 6.2%,50% 以上的仅 2%,这进一步表明甘肃省农业生产潜力还很大。

3 结论

除了降水潜力以外,甘肃省农业生产潜力总体上表现为河西地区高于其它地区,在小区域范围内多为平川地区高于山区。土地潜力与粮食单产的对比分析表明二者具有较高的相关性,对粮食单产与土地潜力的比率进行分级统计的结果表明甘肃省农业生产潜力很大。另外,温度、降水、水资源和土地有效系数的空间格局显示出每种因子对农业生产的限制

和促进作用。

参考文献

- [1] Loomis R S and Williams W A. Maximum crop productivity: An estimate. *Crop Science*. 1963, 3(1): 67~ 72.
- [2] Bonner J. The upper limit of crop yield. *Science*, 1966, 37(3).
- [3] Higgins G.M., et al., land, food, and population in the developing world, nature and resources, 1984, 20(3).
- [4] Higgins G.M. et al., Regional assessment of land potential: A follow up to the FAO/UNESCO Soil Map of the world. *Nature and Resources*, 1981, 17(4).
- [5] 任美镔. 四川省农作物生产力的地理分布. *地理学报*, 1950.
- [6] 汤佩松. 从植物的光能利用率看提高单位面积的产量. *人民日报*, 1964, 11~ 12.
- [7] 尼取波罗尼奇. 论提高作物群体光和生产率的途径, 作物产量形成与高产理论(译文集), 上海: 上海科技出版社, 1966.
- [8] 竺可桢. 论我国气候的几个特点及其与粮食作物生产的关系. 见: 竺可桢文集. 北京: 科学出版社, 1979. 455~ 465.
- [9] 龙斯玉. 气候生产力研究——气候生产力模式. *农业气象*, 1980(3): 56~ 65.
- [10] 田国良. 呼伦贝尔草原的太阳分光辐射能和光合潜力. *地理学报*, 1980, 35(1): 76~ 82.
- [11] 于沪宁. 光热资源和农作物的光热生产潜力. *气象学报*, 1982, 40(3): 321~ 327.
- [12] 黄秉维. 中国农业生产潜力——光合潜力. 见: *地理集刊*(17). 北京: 科学出版社, 1985. 15~ 22.
- [14] 石玉林, 陈百明. 中国土地资源生产能力及人口承载力研究. 北京: 中国人民大学出版社, 1991.
- [15] 冷疏影. 地理信息系统支持下的中国农业生产潜力研究. *自然资源学报*, 1992, 7(1): 71~ 79.
- [16] De Wit C. T. et al. Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops. *Simulation Monographs*. Pudoc, Wageningen, 1978, 140.
- [17] 党安荣等. 地理信息系统支持下的中国粮食生产潜力研究, *遥感学报*, 1999, 3(3): 225~ 229.
- [18] 党安荣, 阎守邕, 吴宏歧等. 基于 GIS 的中国土地生产潜力研究, *生态学报*, 2000, 20(6): 910~ 915.
- [19] 王思远, 张增祥, 赵晓丽等. GIS 支持下不同生态背景的土地利用空间特征分析, *地理科学进展*, 2001, 20(4): 324~ 330.
- [20] 陈佑启, Ver. PHU. 中国土地利用变化及其影响的空间建模分析, *地理科学进展*, 2000. 19(2), 116~ 127.

A Study on Potential Land Productivity Based on GIS Technology in GANSU Province

ZHENG Haixia, FENG Zhiming, YOU Songcai

(Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101)

Abstract Based on previous researches on potential agricultural productivity and supported by geographical information system (GIS) technology and agricultural databases which in-

clude spatial databases and attribute databases, potential land productivity in Gansu province was studied. By using the mechanism methodology, the model of potential agriculture productivity was established. Effective coefficients for factors such as radiation, temperature, water and land were decided; then potential photosynthesis productivity, potential temperature productivity, potential precipitation productivity, potential agricultural water resources productivity and potential land productivity in Gansu province were calculated. The results show the spatial distribution inconsistency between agricultural production and agricultural resources in Gansu province, and this reveals the different limitation of radiation, temperature, water and land effective coefficient to agricultural production. Finally, we contrasted the yield of per unit area and potential land productivity in county level.

Key words: potential agricultural productivity; constraint factors; constraint factor efficient; Gansu Province

图版 I
郑海霞等：基于 GIS 的甘肃省农业生产潜力研究

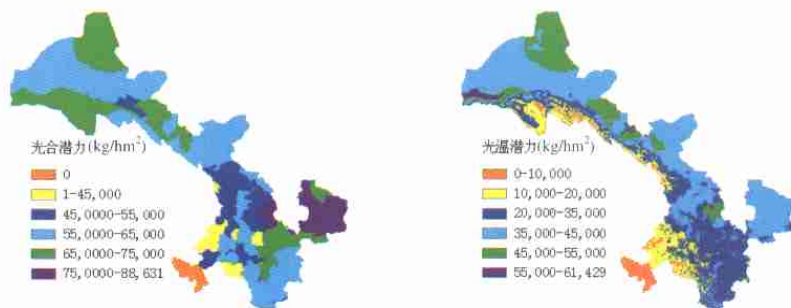
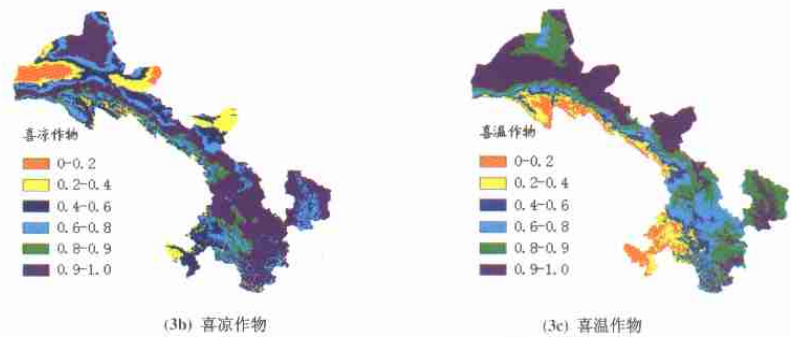


图 2 光合潜力空间分布

Fig.2 Spatial distribution of potential photosynthesis productivity

(3a) 光温潜力

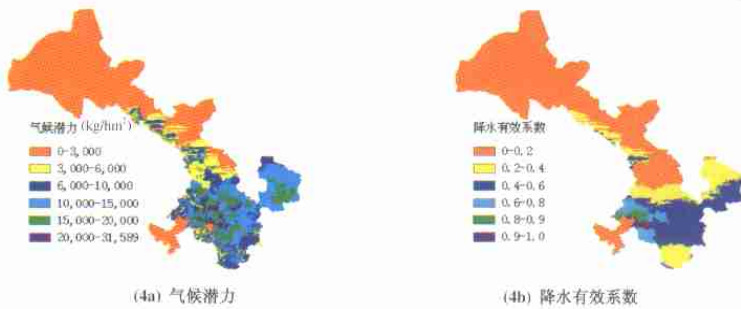


(3b) 喜凉作物

(3c) 喜温作物

图 3 光温潜力及 7 月温度有效系数

Fig.3 Potential temperature productivity and temperature effective coefficient in July



(4a) 气候潜力

(4b) 降水有效系数

图 4 降水潜力和小麦降水有效系数

Fig.4 Potential precipitation productivity and precipitation effective coefficient of wheat

图版 II
郑海霞等：基于 GIS 的甘肃省农业生产潜力研究

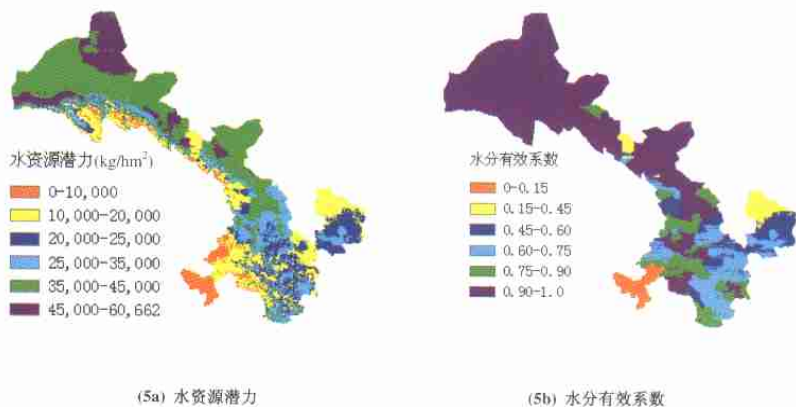


图 5 农业水资源潜力和小麦水分有效系数

Fig.5 Potential agricultural water resources productivity and crop water effective coefficient of wheat

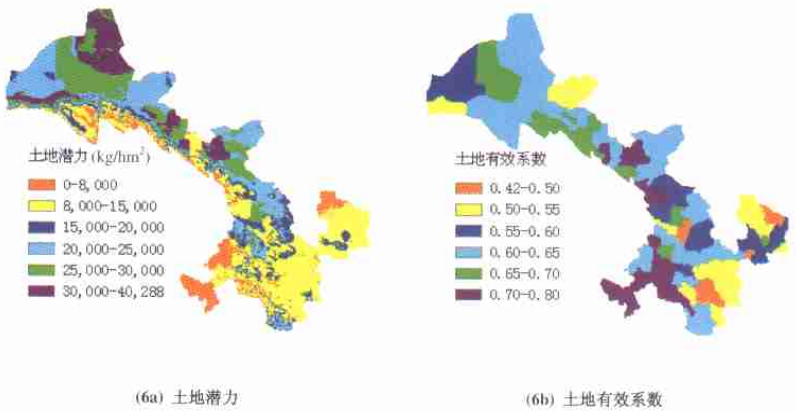


图 6 土地潜力和土地有效系数

Fig.6 Potential land productivity and land effective coefficient