

# 农业综合生产潜力指标体系及其模型改进

王 青<sup>1</sup>, 李国蓉<sup>1</sup>, 俞 音<sup>1</sup>, 慕长龙<sup>2</sup>, 丁明涛<sup>1</sup>

(1. 西南科技大学环境与资源学院, 绵阳 621010; 2. 四川省林业科学研究院, 成都 610081)

**摘 要:** 在系统分析自然生产潜力经典研究成果的基础上, 进一步考量社会经济因素的影响, 根据土、肥、水、种、密、保、管、工 8 个影响作物产量形成的主要社会经济因素构建社会经济生产潜力系统, 形成了较为完善的农业综合生产潜力指标体系; 并引入社会经济修正函数对现有的农业自然生产潜力模型进行完善, 构建农业综合生产潜力模型。农业综合生产潜力指标体系及其模型, 为定量评估农业资源利用程度提供了一种有效手段。

**关 键 词:** 农业生产; 指标体系; 自然生产潜力; 修正函数; 综合模型

农业生产潜力是进行农业分区, 估算作物产量和制定农业发展规划及有关农业政策的重要依据。关于农业生产潜力的综合研究是揭示作物产量与环境条件的相互作用机制, 是定量评估自然资源利用程度和估算土地承载力的重要基础。目前, 农业生产潜力的研究主要侧重于自然生产潜力, 已形成系统的理论体系与定量模型, 但对社会经济系统的影响考虑较少。因此, 在自然生产潜力研究的基础上, 兼顾社会经济因素的影响, 并通过建立完整的指标体系来构建农业综合生产潜力模型, 具有重要的理论和现实意义。

## 1 相关研究简要回顾

农业生产潜力是多因素综合作用的结果, 主要包括光、热、水、土等自然资源, 同时也受与土地资源开发有密切关系的社会-经济-技术因素影响。其中, 土地资源是人类赖以生存的核心资源, 也是农业资源生产力的载体, 为此, 国内外有关农业资源生产潜力的研究主要集中于土地资源生产潜力。

在国外, 早期关于土地生产潜力的研究主要侧重于研究生物产量与环境因子以及各环境因子之间的相互作用机制。土地生产潜力的研究围绕光合作用潜力从理论上计算了作物最大的生产能力, 再按照衰减法则逐级订正, 研究成果可分为两类。一类是适用于全球范围、综合的生物生产量的数学模

型, 例如用降水量和平均温度估算生物生产量的迈阿密模型(Miami Model); 用实际蒸散量估算生物生产量的桑斯韦特纪念模型(Thornthwait); 由生长期和生产量的相关性而总结的经验模型 (Gessner 和 Lieth)等。另一类是适用于小范围估算某些或某种作物生物生产量的数学模型, 其中影响较大的有瓦赫宁根法 (Wageningen Model); Kassam 为联合国粮农组织农业生态区域项目研制农业生态区域法(AEZ)等<sup>[1]</sup>。

中国对于土地生产潜力的研究最早可以追溯到 1950 年, 任美镔在地理学报上发表的《四川省农作物生产力的地理分布》一文中, 首次提出了中国生产力研究的重要性, 并以农业生产力为基础估算土地承载力。20 世纪 60 年代, 竺可桢最早研究中国气候与粮食生产的关系<sup>[2]</sup>。20 世纪 70 年代以来, 从物质与能量转化角度来研究土地生产潜力已比较成熟, 如黄秉维的光合生产潜力估算公式<sup>[3]</sup>、龙斯玉提出的气候生产潜力公式<sup>[4]</sup>, 其后诸多学者的进一步工作<sup>[5-7]</sup>, 使得中国土地生产潜力研究呈现蓬勃发展态势。其中最有影响的是由中国科学院自然资源综合考察委员会于 1986-1990 年间开展的中国土地资源生产能力及人口承载力研究, 从土地、粮食(食物)与人口相互关系, 回答了我国不同时期的食物生产力及其可供养人口规模, 并提出了提高土地承载力、缓解人地矛盾的主要措施<sup>[1]</sup>。90 年代以来, 诸多学者针对不同土地利用方式以及不同作物

收稿日期: 2009-08; 修订日期: 2009-11.

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划(2006BAD03A0204)。

作者简介: 王青(1967-), 男, 博士后, 副教授, 主要从事环境规划与管理方面研究。E-mail: qingw@imde.ac.cn

通讯作者: 慕长龙(1964-), 博士, 研究员, 主要从事森林生态研究。E-mail: mucl2006@yahoo.com.cn

对生产潜力进行了估算<sup>[8-9]</sup>,并对中国不同地区的土地生产潜力进行了理论与实证研究<sup>[10-19]</sup>。

2 农业综合生产潜力指标体系

2.1 指标体系构成

农业生产是植物利用太阳能把无机物转变为有机物,把太阳能转变为化学能的一个物质和能量的转化过程;同时又是人类社会有组织的经济活动,是自然再生产与经济再生产密切结合的物质生产过程。因此,影响农业生产潜力的因素大致可以分为两类:一是自然因素;二是社会经济因素。

在前人关于农业自然生产潜力研究的基础上,围绕 1958 年中央提出的“土、肥、水、种、密、保、管、工”农业八字宪法<sup>[20]</sup>,并结合 1964 年竺可桢院士补充的光和气<sup>[2]</sup>,将影响农业生产潜力的多种因素归纳为自然因素与社会经济因素两大类,建立完整的指标体系(图 1)。

2.2 自然生产潜力系统

根据限制作物生长和产量的主要环境因子,选取光照、热量、降水和土壤为主要指标,建立自然生产潜力指标体系。

(1)光照:万物生长靠太阳。作物产量的形成主要依靠太阳辐射,由叶片及其他光合器官将从空气中吸收的 CO<sub>2</sub> 和从土壤中吸收的水分制成碳水化合物。评价某一区域的太阳辐射条件可用太阳总辐射能和光能利用率来表示。

(2)热量:农业是露天作业,受热量的影响较大。对农业生产而言,气温是作物生长发育必需的条件之一,作物的整个生长发育过程均必须在合适的温度范围及其足够的持续时间条件下才能完成,否则作物的生长就会受到抑制。

(3)降水:水是植物进行物质生产不可缺少的要素,太多或太少都不利于作物的生长发育,不利于耕作、收获等农事活动。降水的分布与变化,不仅决定了地表水的丰缺状况,而且影响着地下水的成分、数量和分布等,是影响土地资源利用与生产力的关键因素。

(4)土壤:土壤是陆地上能生长植物的疏松表层,表现出不同的理学性状和肥力特征。良好的土壤本底条件是作物有效利用其他因素的关键,是其它各项措施更能发挥作用的基础。

2.3 社会经济生产潜力系统

根据影响作物产量形成的主要社会经济影响

因素,围绕“土肥水种,密保管工”农业八字宪法,建立较为完整影响作物生产潜力的社会经济生产潜力指标体系。

(1)改土:土地是农业的基本生产资料,在一定的社会经济条件下,农业发展的规模和速度,不仅

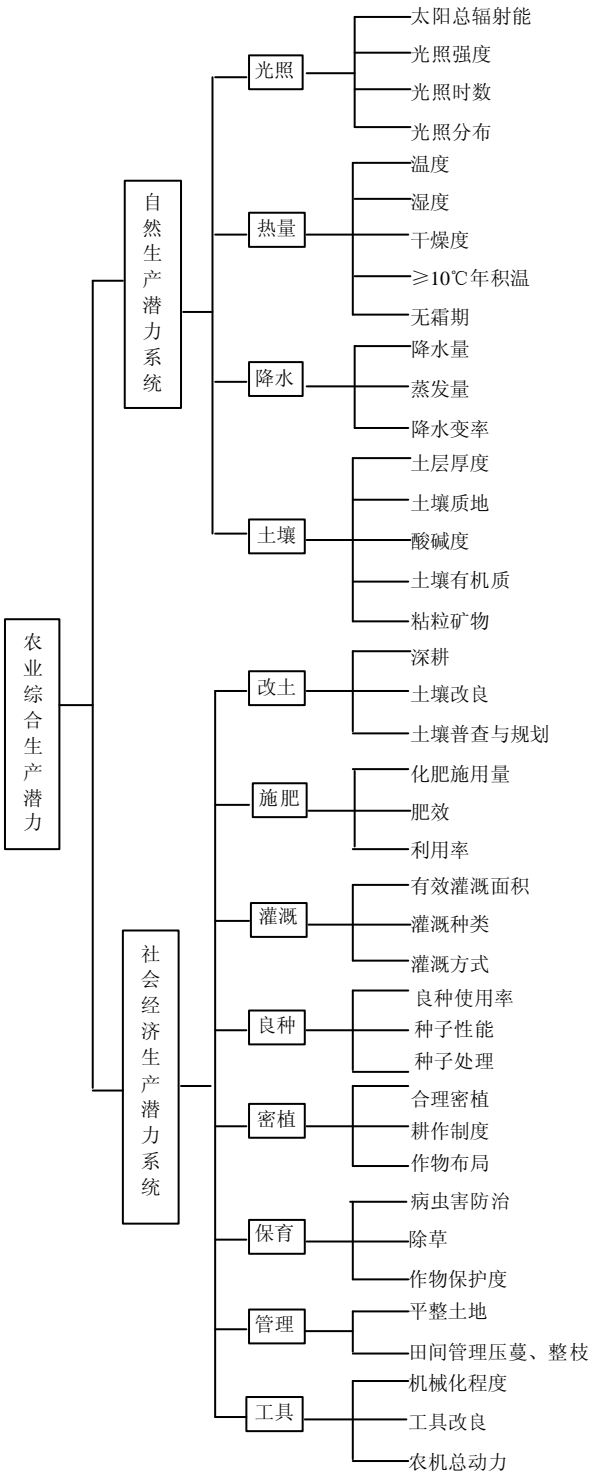


图 1 农业综合生产潜力指标体系  
Fig.1 Indicator system of agricultural integrated potential productivity

取决于对土壤的综合利用状况、土壤的改良,而且还取决于对土壤的规划与管理。

(2)施肥:增施肥料不仅可以供给作物所需的养料,调节和改良土壤的物理化学性质,还能够改善土壤里的生物条件,为农作物生长发育创造良好的环境。

(3)灌溉:水利是农业的命脉。在一定范围内,采取人为措施,通过水利工程对天然降水进行时间和空间的重新分配,保证作物生长对水分的需求,是获得农业丰收的重要途径。

(4)良种:种子是农业的基本生产资料,是获得丰收的内在条件。良种包括选育新品种、品种审定、良种繁殖、提纯复壮、种子检验、种子精选加工、经营推广等一系列的工作。

(5)密植:在一定的时间和空间内,充分利用阳光、空气和地力,增大单位面积上作物群体受光的叶面积,大幅度地实现无机物质向有机物质的转化,是促使农作物增产的有效途径。

(6)保育:就是采取各种有效地措施和方法,控制、消灭农作物的病虫害和防御各种自然灾害,保护农作物的正常生长发育,达到稳产高产。

(7)管理:田间管理是贯彻在作物全生育过程中一整套的农业技术措施。其基本要求是在认识作物的生长发育规律、掌握影响作物生育的生活环境条件的基础上,积极创造和充分利用有利因素,满足作物对营养和环境的需要,促使作物高产,把增产的可能性变成现实。

(8)工具:改良工具一般是在现有农具的基础上,在性能、结构、材料等方面加以改进,使作业质量、工效有所提高。

3 农业综合生产潜力模型

3.1 农业自然生产潜力模型集群

农业自然生产潜力是多种因素综合作用的结果,因此,农业自然生产潜力模型客观上应该是一个模型集群。

中国现有的农业自然生产潜力模型,依据限制植物生长和作物产量系统的主要环境因子,由光合生产潜力—光温生产潜力—气候生产潜力—气候土壤生产潜力逐级订正而建立,对于生产潜力的每一级订正都依据一个主要影响因子,假设其他因子均处在理想条件下。

3.1.1 光合生产潜力

光合生产潜力又称光合潜力、光能潜力,是在理想状态下植物的最高生产力,由光能资源和植物光合效率所决定的。其中,能够被绿色植物利用来进行光合作用那部分辐射(光合有效辐射),是形成生物量的基本能量。光合生产潜力一般形式为:

Y\_0=KF\frac{EQ}{Z(1-C)}=Y(Q) (1)

式中:Y\_0、Y(Q)为光合生产潜力;K 为单位转换系数;F 为经济系数;E 为作物的光能利用率;Q 为太阳总辐射能;Z 为能量转换系数;C 为作物灰分率。

3.1.2 光温生产潜力

温度条件影响光合潜力的发挥,不同作物对生育期的最适温度要求不同,特别是喜温作物与喜凉作物有很大差别。因此,需通过温度影响函数,来修正光合生产潜力。

Y\_1=Y(Q,T)=Y\_0\cdot f(T) (2)

f(T)=\begin{cases} 0 & (T\leq T\_m) \\ T/(T\_M-T\_m) & (T\_m<T\leq T\_M) \\ 1 & (T>T\_M) \end{cases} (3)

式中:Y\_1、Y(Q,T) 为光温生产潜力;f(T)为温度影响的订正系数,0<f(T)<1;T\_M、T\_m 为作物生育所需的上极限温度;T\_m 为作物生育所需的下极限温度;T 为作物生育期间的平均温度。

3.1.3 气候生产潜力

气候生产潜力在光、温保持最适宜状态时,自然降水条件下一个地区可能达到的作物产量上限。对光温生产潜力进行水分订正求算气候生产潜力:

Y\_2=Y(Q,T,W)=Y\_1\cdot f(W) (4)

f(W)=\begin{cases} \frac{r}{E\_0} & (r\leq E\_0) \\ 1-\frac{r-E\_0}{3E\_0} & (E\_0<r<4E\_0) \\ 0 & (r\geq 4E\_0) \end{cases} (5)

式中:Y\_2、Y(Q,T,W)为气候生产潜力;f(W)为水分影响订正系数(水分影响函数模型),0<f(W)<1;r、E\_0 为月或旬降水及蒸发力。

3.1.4 农业自然生产潜力

土壤作为作物及其生长必须的矿物营养和水分的载体,很大程度上制约着农业自然生产潜力。在特定的气候生产潜力条件下,因土壤限制所能实现的生产能力就是农业自然生产潜力。



$$Y_3=Y(Q,T,W,S)=Y_2 \cdot f(S)=Y_n \tag{6}$$

式中： $Y_3$ 、 $Y(Q,T,W,S)$ 为气候土壤生产潜力； $f(S)$ 为土壤肥力订正函数， $0<f(S)<1$ 。

$$f(S)=\min(PU \cdot B \cdot Q_m \cdot H \cdot E_c \cdot N_u) \tag{7}$$

式中： $P$ 为土壤剖面指数； $U$ 为表土质地指数； $B$ 为土壤耕层结构指数； $Q_m$ 为土壤有机质指数； $H$ 为土壤酸碱度指数； $E_c$ 为土壤代换量指数； $N_u$ 为土壤养分指数。

上述农业自然生产潜力模型集群表明，一个区域的农业自然生产潜力由光合生产潜力—光温生产潜力—气候生产潜力—气候土壤生产潜力依次衰减；四个层次在整体有序协调的量比关系下，会获得较高的自然生产潜力。

3.2 社会经济修正模型

农业综合生产指标体系表明，农业生产是自然再生产与经济再生产紧密结合的物质生产过程。农业自然生产潜力模型仅从影响生产潜力的自然因素来考虑，而影响农业生产的社会因素在模型中没能系统体现。土地生产潜力与一定的社会经济投入是成正比的，如能在上述有关土地生产潜力自然因素量化计算的基础上，进一步考虑经济技术投入对产出的影响，就可以较客观地反映农业土地的实际生产潜力。从理论上讲，农业自然生产潜力模型是基于光合生产潜力，按照光温、气候、土壤等限制因子逐级订正而构建起来的，而对于生产潜力的每一级订正均为依次衰减。而对于社会经济系统而言，本质上也是对于农业自然生产潜力模型的再次订正，所不同的是，人类社会系统对农业生产的影响是积极的，是按照科学规律对生产潜力的正向或递增修正，且在不同的区域所起的作用存在着明显的差异。可见，8个因子是作为一个整体对农业自然生产潜力进行修正，因而，各个因子对农业生产潜力的贡献度是相对的，需要考虑各因子的权重。为此，社会经济系统对于农业自然生产潜力模型的影响，可以通过综合各项指标权重及其贡献度(分值)来反映。社会经济对土地自然生产潜力的修正函数

$$f(h): \qquad f(h)=\sum_{i=1}^8 X_i \cdot W_i \tag{8}$$

式中： $f(h)$ 为社会经济对土地自然生产潜力的修正函数； $X_i$ 为第*i*个社会经济因子的贡献度； $W_i$ 为第*i*个社会经济因子的权重系数。在公式(8)中，社会经济生产潜力修正函数中某一因子的贡献度是指在其他7个因子处于理想状态下，该因子对农业自然

生产潜力的最佳修正参数。

3.3 农业综合生产潜力模型

针对一个具体的区域，利用3.1农业自然生产潜力模型集群计算得出的农业自然生产潜力是确定的。采用社会经济生产潜力修正函数 $f(h)$ 对农业自然生产潜力进行修正，可建立农业综合生产潜力模型Y：
$$Y=Y_n \cdot f(h) \tag{9}$$

4 模型应用

农业综合生产潜力模型是一个通用的表达式。事实上，在不同农业生产类型区域，由于农业自然条件及社会因素千差万别，制约农业生产的因子也不尽相同。本文选取绵阳市官司河流域，就模型的应用进行案例研究。

4.1 自然生产潜力估算

官司河位于四川省绵阳市，是涪江支流芙蓉溪的一个小支流，流域内的主要粮食作物为水稻、小麦、玉米。采用农业自然生产潜力阶乘修正模型，分别就流域内水稻、小麦、玉米3类主要粮食作物的光合、光温、气候及自然生产潜力进行估算(表1)。

4.2 自然生产潜力与现实生产量比较

官司河流域1987—2007年间三类作物的现实生产力数据见表2，比较1987年与2007年数据可

表1 官司河流域农业自然生产潜力计算结果 (单位: kg/hm<sup>2</sup>)

Tab.1 Agricultural physical potential productivity in Guansi Basin (unit: kg/hm<sup>2</sup>)

项目	水稻	小麦	玉米	平均订正系数	
				因子	%
光合生产潜力( $Y_0$ )	25519.13	24012.94	21488.44	温度	81.3
光温生产潜力( $Y_1$ )	22967.22	14167.64	20414.02	水分	74.0
气候生产潜力( $Y_2$ )	17030.19	10505.30	15136.99	土壤	63.0
自然生产潜力( $Y_3$ )	10785.22	6653.01	9586.26		

表2 官司河流域农业现实生产力

Tab.2 Actual agriculture productivity in Guansi Basin

年份	稻谷	小麦	玉米
	单产/(kg/hm <sup>2</sup> )	单产/(kg/hm <sup>2</sup> )	单产/(kg/hm <sup>2</sup> )
1987年	6862.69	3609.45	3067.77
1992年	8117.50	4254.84	3862.13
1997年	7969.78	4364.29	3847.84
2002年	7498.57	4020.55	4111.71
2007年	7956.88	4617.42	4502.29
自然生产潜力	10785.22	6653.01	9586.26

以看出,稻谷增产 15.9%,小麦增产 27.9%,玉米增产 46.8%。2007 年的实际生产力与自然生产潜力理论值相比较,三类作物依然有较大的增产潜力。

4.3 社会经济系统对农业自然生产潜力贡献度排序

通过对刘家河气象观测点(邻近官司河流域)1987–2007 年期间资料分析,官司河流域气温、降水等自然因素基本稳定。可以说产量的增加主要归功于社会经济因素的影响。因此,开展社会经济系统对农业自然生产潜力贡献度的排序研究,可客观反映出流域内社会经济因子对增产的贡献度大小,从而提出提高农业现实生产力的有效途径。本文对官司河流域社会经济生产潜力系统二级指标(图 1)进行层次分析,各因子判断矩阵及权重见表 3。

通过对社会经济生产潜力系统三级指标进行层次分析,按照贡献度计算结果大小依次排序为:灌溉方式>种子性能>病虫害防护>良种使用率>田间管理>合理密植>肥效>灌溉种类>化肥施用量>土壤改良>除草>有效灌溉面积>种子处理>化肥利用率>平整田地>耕作制度>机械化程度>作物保护度>作物布局>土壤规划与管理>农机总动力>土壤综合利用>工具改良。

在官司河流域,对产量增加贡献度最大的是灌溉指标下的灌溉方式,其次为良种指标的种子性能,再次为保育指标的病虫害防治。因此,对现实生产力提高的最好办法就是优化灌溉方式,提高种子性能,加强病虫害防治。

5 结论

在系统分析自然生产潜力经典研究成果的基础上,进一步考量社会经济因素的影响,可为定量评估农业资源利用程度提供一种有效手段。

(1)中国是个传统的农业大国,几千年的农耕文化,劳动人民已经成功地总结了许多提高农业粮食产量的经验与措施。建国以来,中央提出的农业八字宪法“土、肥、水、种、密、保、管、工”就是对传统农业的系统的、完整的总结。本文将传统的农业思想作为社会经济主导因子,合理的与已有自然生产潜力系统结合起来后,构建完整的农业综合生产潜力指标体系,便于从中找出提高农业生产力的着力点

表 3 判断矩阵及权重  
Tab.3 Comparison matrix and weights

重要度	良种	灌溉	施肥	保育	管理	密植	改土	工具	权重
良种	1	1	2	3	4	3	5	7	0.2590
灌溉	1	1	2	3	4	3	5	7	0.2590
施肥	1/2	1/2	1	1/3	2	1	3	6	0.1116
保育	1/3	1/3	3	1	3	1/2	3	5	0.1252
管理	1/4	1/4	1/2	1/3	1	4	3	5	0.0917
密植	1/3	1/3	1	2	1/4	1	2	3	0.0848
改土	1/5	1/5	1/3	1/3	1/3	1/2	1	2	0.0431
工具	1/7	1/7	1/6	1/5	1/5	1/3	1/2	1	0.0256
一致性检验	CR=CI/RI=0.083<0.1								

和途径。

(2)对于农业综合生产潜力模型而言,难点就在于根据影响作物产量形成的主要社会经济因素,建立社会经济修正函数模型,并对自然生产潜力模型进行完善,这是一件具有重要科学意义的综合性工作。由于各地自然条件不同,社会经济系统对土地现实生产力的贡献度存在着明显的地域差异,本文关于排序仅为官司河流域的示范性研究。

(3)由于农业生产具有明显的地域特性,在不同地域,社会经济系统中的各因子对农业增产所起的作用存在着明显的差异。为此,对于农业综合生产潜力模型在具体区域的应用,需要在把影响作物产量的主导因子以及各因子间存在着的限制关系研究深透的基础上,来界定社会因素的指标分值及权重。

参考文献

[1] 孟庆香. 陕北农牧交错带土地生产潜力及人口承载量研究. 西北农林科技大学硕士学位论文, 2003: 2–4.

[2] 竺可桢. 论我国气候的几个特点及其与粮食作物的关系. 地理学报, 1964, 30(1): 111.

[3] 黄秉维. 华北平原农业和水利问题及农业生产潜力. 地理集刊, 1985, 17: 1–14.

[4] 龙斯玉. 江苏省农业气候资源生产潜力及区别的研究. 地理科学, 1985, 5(3): 218–226.

[5] 陈明荣, 龙斯玉. 中国气候生产潜力区划的探讨. 自然资源, 1984(3): 72–79.

[6] 李继由. 我国不同地区的作物光合潜力的计算. 农业气象, 1980, 1(4): 10–13.

[7] 梁荣欣, 张瑞雪. 水稻的气候土壤生产潜力估算. 自然资源, 1984(2): 68–73.

[8] 崔文华, 辛亚军, 伶艳菊, 等. 内蒙古东部区主要作物降水利用率与生产潜力研究. 土壤通报, 2004, 35(5): 592–595.

[9] 邵晓梅, 刘春玲. 鲁西北地区农业土地资源生产潜力估

算. 中国农业气象, 2004, 25(4): 5–10.

[10] 刘卫东. 土地生产潜力的计算方法. 资源开发与保护, 1993, 9(4): 285–288.

[11] 郭秀锐, 毛显强. 中国土地承载力计算方法研究综述. 地球科学进展, 2000, 15(6): 705–711.

[12] 刘金铜, 由懋正. 河北沧州黑龙港地区粮食作物生产潜力估算. 自然资源学报, 1991, 6(4): 318–325.

[13] 沈思渊, 席承藩. 淮北涡河流域农业自然生产潜力模型与分析. 自然资源学报, 1991, 6(1): 22–23.

[14] 周锁铨, 戴进, 姚小强. 土地生产潜力和人口承载力方法的研究: 以陕西宝鸡地区为例. 自然资源, 1992(6): 56–62.

[15] 何长高, 尹忠东. 紫色土区土壤侵蚀对土地生产潜力的影响研究. 水土保持学报, 2001, 15(4): 110–114.

[16] 戴全厚, 刘明义, 王跃邦, 等. 东北地山丘陵区土地适宜性评价与潜力分析. 水土保持通报, 2003, 23(1): 27–31.

[17] 高文彬, 江东, 杨小唤. 遥感数据驱动的耕地生产潜力模型与应用. 地理科学进展, 2009, 28(4): 597–602.

[18] 李方敏, 秦巧燕, 程彩虹. 宜昌市耕地生产潜力和人口承载力研究. 农业系统科学与综合研究, 2007, 23(3): 342–346.

[19] 崔方, 李新平, 魏迎春. 新疆和田开发区土地生产潜力评价与土壤修正系数的确定. 干旱地区农业研究, 2007, 25(3): 125–128.

[20] 刘瑞祥. 农业八字宪法浅说. 北京: 农业出版社, 1980.

Indicators and Model on Agricultural Intergrated Potential Productivity

WANG Qing<sup>1</sup>, LI Guorong<sup>1</sup>, YU Yin<sup>1</sup>, MU Changlong<sup>2</sup>, DING Mingtao<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Resources, Southwest University of Science & Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;  
2. Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China)

**Abstract:** By analysis of the classical research achievements of physical potential productivity and famous agro-laws on social-economic factors since the 1960s in China, this paper presented relative systematic indicators on the integrated agricultural potential productivity. According to the main environmental factors relateded to plant growth and grain yield, the authors selected sun-light, heat, precipitation and soil as the key indicators to establish a system of physical potential productivity, and then according to the eight factors of soil cultivating, fertilization, irrigation, species improving, efficient planting, pest controlling, land management, and instrument improving in China, established a system of social-economic potential productivity. Based on these indicators, the authors introduced some amendment parameters of the main socio-economic factors to correct and revise the existing typical agricultural physical potential productivity models. The search results on integrated agricultural potential productivity indicator system and model may provide an effective tool to assess quantitatively on the utilization degree of agricultural resources.

**Key words:** agricultural productivity; indicator system; physical potential productivity; amendment parameter; integrated model

本文引用格式：  
王青, 李国蓉, 俞音, 等. 农业综合生产潜力指标体系及其模型改进. 地理科学进展, 2010, 29(3): 273–278.