

基于空间插值技术和辅助信息的吉林省 玉米土地生产潜力研究

石淑芹¹, 陈佑启^{2,3}, 李正国^{2,3}, 杨鹏^{2,3}, 吴文斌^{2,3}, 汤芳⁴

(1. 天津工业大学管理学院, 天津 300387; 2. 农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室, 北京 100081;
3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 4. 武汉市土地储备整理中心, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 为提高作物生产潜力估算精度, 利用 GIS 技术, 将作物生产力逐步衰减模型与 ArcGIS 空间分析中 GRID 建模相结合, 建立了作物生产潜力模型, 并利用空间插值技术和辅助信息对估算光温-气候-土地生产潜力所需的气象和土壤要素等进行了重点模拟。其中, 采用多元回归+残差内插方法, 对吉林省气象站点观测的温度和降水数据进行了空间模拟; 将相关性较高的变量作为协因子进行了土壤养分的 Cokriging 插值, 并结合土壤类型数据, 获取了土壤 pH 值、有机质、速效钾、碱解氮及速效磷的空间模拟数据。最后利用温度、水分及土壤订正系数, 估算出吉林省玉米各级生产潜力, 并分析其空间分布特征。

关键词: 生产潜力; 空间插值; 辅助信息; GIS

中图分类号: S162.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)05-0209-10

作物生产潜力是粮食生产研究的重要组成部分, 可直接反映一个国家或地区的粮食生产水平。因此, 国内外学者从不同层次、不同角度开展了大量研究, 而且随着计算机技术的日渐成熟、数学模型的发展以及对作物产量形成机理认识的加深, 作物生产潜力研究也逐渐向科学化和精确化的方向推进^[1]。其中机制法是广泛应用的土地生产潜力计算方法^[2]。

作物的生产潜力具有时空方面的差异性, 即作物生产潜力随着区域的不同、时间的差异以及社会经济条件的改变而变化。已有研究表明, 一个地区的土地生产潜力往往远没有得到充分发挥。对于粮食作物来讲, 即使粮食生产水平较高的地区, 其农业气候资源、土壤资源、后备资源和农业技术水平提高的潜力还是很大。但以往利用机制法计算光、温、水、肥生产潜力, 多数气候要素采取气象局的定位观测数据, 用一个点上测得的气温、降水和辐射等数据代替整个研究区或者研究区内的潜力单元^[3], 由于田间土壤周围自然地理条件和环境信息的复杂性和不确定性, 大尺度的土壤属性空间化数据难以获取, 土壤有效系数难以准确订正, 因此, 最终计算的生产潜力并未真正体现光、温、水及土地生产潜力的空间化变异。然而近年来, 随着空间插值技术的

发展以及其和 GIS 结合技术的广泛应用, 使得一些气候因素(光、温、水等)、土壤因素和社会经济因素的空间化模拟成为可能, 从而使以象元为潜力单位计算土地生产潜力, 更加准确地反映土地生产潜力的空间分布特征成为可能。而目前, 采用基于 3S 技术以及地统计学的空间插值技术的研究还比较薄弱。

本研究利用 GIS 技术, 通过对农业生产过程的系统分析, 把作物生产力逐步衰减模型与 ArcGIS 空间分析中 GRID 建模相结合, 建立了作物生产潜力模型, 并利用空间插值技术和辅助信息对所需的气象要素、土壤要素等空间模拟方法进行了重点研究, 最后应用机制法估算吉林省玉米各级生产潜力, 并分析其空间分布特征。

1 研究区域概况

吉林省位于东经 121°38' ~ 131°19', 北纬 40°52' ~ 46°18', 地处世界著名的“黄金玉米带”, 是中国玉米的主产区和重要的商品粮基地。但近些年来, 气候变暖使得作物生产潜力受到影响, 而不合理的利用使土壤肥力退化趋势逐年加剧, 部分地区土地盐碱化程度明显, 沙漠化土地分布较为广泛, 都影响玉米产量潜力的发挥。在我国加入 WTO 后, 国际市场

收稿日期: 2011-05-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 计划项目(2010CB951502); 国家自然科学基金项目(41101537, 40930101); 教育部人文社会科学基金项目(10YJCZH129); 天津市科技支撑项目(08ZCGHHZ00900)

作者简介: 石淑芹(1980—), 女, 山东淄博人, 讲师, 研究方向为土地利用与 GIS 工程。E-mail: esq0533@163.com。

通讯作者: 陈佑启, E-mail: chenyoqi@mail.caas.net.cn。

竞争加剧,玉米生产必须向优质方向发展,以增加市场竞争力。

吉林省属温带大陆性季风气候,冬季寒冷漫长而干燥,夏季温暖多雨而短促,雨热同季。三面环山,平原面积约占 55.8%。地势由东南向西北倾斜,呈现明显的东南高、西北低的特征。以中部大黑山为界,可分为东部山地和中西部平原两大地貌区。这种特定的地形条件决定了该区域气温和降水的空间分布很大程度上受到地形的影响,最终决定了气候生产潜力与地形条件有一定关系。全省土壤类型多样,土质肥沃。土壤共有 19 个土类、73 个亚类、161 个土属、543 个土种。其中,黑土、黑钙土、淡黑土、草甸土等肥力较高的土壤占 52%,绝大部分分布在中部平原主要农区,约有 300 万 hm^2 以上。东部山地丘陵区耕地土壤,多为棕壤、灰棕壤和白浆土;面积约 100 万 hm^2 , 占全省耕地面积的 18% 左右,是吉林省东部地区主要旱田土壤。多样的土壤类型及复杂的自然地理条件决定了土地生产潜力应该具有较大的空间变异性。

2 模型选择

“机制法”根据作物生产力形成的机理,考虑光、温、水、土等自然生态条件以及农业技术因子,从作物截光特征和光合作用入手,依据作物能量转化及产量形成过程,通过对光合生产潜力 \rightarrow 光温生产潜力 \rightarrow 气候生产潜力 \rightarrow 土地生产潜力几个阶段的逐步“衰减”订正,估算作物土地生产潜力。其估算模型为:

$$\begin{aligned} Y &= Q \times f(Q) \times f(T) \times f(W) \times f(S) \\ &= Y_Q \times f(T) \times f(W) \times f(S) \\ &= Y_T \times f(W) \times f(S) \\ &= Y_W \times f(S) \\ &= Y_S \end{aligned}$$

式中, Y 为土地生产潜力; Q 为生育期太阳总辐射; $f(Q)$ 为光合有效系数; Y_Q 为光合生产潜力; $f(T)$ 为温度有效系数; Y_T 为光温生产潜力; $f(W)$ 为水分有效系数; Y_W 为气候生产潜力; $f(S)$ 为土壤有效系数; Y_S 为土地生产潜力。

(1) 光合生产潜力。

作物光合生产潜力一般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(针对研究区的实际情况,所选作物生育期为 5~9 月份)。计算公式为:

$$Y_Q = Q \times f(Q)$$

$$= \frac{C \cdot S \cdot \epsilon \cdot \varphi \cdot (1 - \beta) \cdot (1 - \rho)}{q \cdot (1 - \eta) \cdot (1 - \xi)} \cdot (1 - \gamma) \cdot (1 - \omega) \cdot f(L) \cdot E \cdot \sum Q_i$$

式中, C 为单位换算系数,统一取 666.7; Y_Q 为单位面积光合生产潜力(kg/hm^2); Q_i 为生长季各月总辐射量(MJ/m^2);其他参数的意义和取值见表 1。

表 1 计算光合生产潜力各参数的意义及取值

Table 1 Meaning and value of photosynthesis potential productivity

参数 Parameter	物理意义 Physical meaning	玉米 Maize
S	作物光合固定 CO_2 能力的比例 Proportion of crop photosynthetic CO_2 fixation capacity	1.00
ϵ	光合辐射占总辐射的比例 Proportion of photosynthetic radiation in total radiation	0.49
φ	光合作用量子效率 Quantum efficiency of photosynthesis	0.22
β	植物繁茂群体透射率 Transmission rate of lush plant groups	0.06
ρ	非光合器官截获辐射比例 Proportion of radiation intercepted by non-photosynthetic organs	0.10
γ	超过光饱和点光的比例 Proportion of light over light saturation point	0.01
ω	呼吸消耗占光合产物的比例 Proportion of respiration in photosynthate	0.30
$f(L)$	作物叶面积动态变化订正值 Revised value of crop leaf area variation	0.58
E	作物经济系数 Crop economic coefficient	0.40
q	单位干物质含热量 (MJ/kg) Heat content in unit dry matter	17.52
η	成熟谷物的含水率 Moisture content of mature grain	0.15
ξ	植物无机灰分含量比例 Proportion of inorganic ash content of plant	0.08

(2) 作物光温生产潜力及温度修正函数。

温度衰减过程的订正是利用月平均温度分段进行订正的,国内外许多学者提出了不同的温度系数修正方法,本文采用马树庆^[4]针对东北地区实际情况的温度修正函数:

$$f(T) = \frac{(T - T_1) \times (T_2 - T)^B}{(T_0 - T_1) \times (T_2 - T_0)^B}$$

式中: $B = \frac{T_2 - T_0}{T_0 - T_1}$; T 是 5~9 月各月的平均气温, T_0 、 T_1 、 T_2 是作物生产的三基点温度,指不同作物在该时段内生长发育的最适温度、下限温度和上限温度。吉林省主要作物不同时期的 T_0 、 T_1 、 T_2 值如表 2。

表 2 玉米的三基点温度(℃)
Table 2 Three-point temperature of maize

月份 Month	生长发育时期 Growth stage	T_0	T_1	T_2
5	苗期 Seedling	20.0	8.0	27.0
6	营养生长期 Vegetative growth	24.5	11.5	30.0
7	营养、生殖并进期 Vegetative and reproductive growth	27.0	14.0	33.0
8	开花/灌浆期 Flowering/filling	25.5	14.0	32.0
9	灌浆成熟期 Filling and maturity	19.0	10.0	30.0

(3) 作物气候生产潜力及降水有效系数。

作物气候生产潜力是在光温生产潜力上进行农田水分条件订正而得到的,考虑了作物生产过程中对水分的需求。因目前各地仍主要依靠自然降水,因而它是通过改良土壤、采用良种良法等技术就可以达到的高产指标。

应用农田水分评价模式定量评价各生长期水资源对农作物生长发育的满足程度,表达式为:

$$f(W)_j = 1 - |\Delta W_j| \times k / W_j$$

式中: $\Delta W_j = R_j - W_j$, $W_j = E_j \times \alpha_j$, R_j 为 5 ~ 9 月各月平均降水; W_j 为某时期、某作物的需水量(mm); E_j 为草地蒸发力, E_j 采用《吉林省农业气候资源及农业气候区划》中提供的数据, k 是经验参数,当 $\Delta W_j \geq 2$ mm 时,农田水分过多, $k < 1$; $\Delta W_j < 2$ mm 时,降水适中或偏少, $k = 1$ 。 α_j 为作物不同时期的作物系数,本文所采用的作物系数值如表 3 所示。

表 3 各生育期作物系数值
Table 3 Crop coefficient of every growth stage

月份 Month	作物系数 Crop coefficient
5	0.4
6	0.8
7	1.26
8	1.25
9	0.73

(4) 光温水土生产潜力(土地生产潜力)。

土地生产潜力,是在气候生产潜力基础上,经土壤有效系数 $f(S)$ “衰减”后形成的,土地生产潜力计算的关键是土壤有效系数 $f(S)$ 的确定。本文中首先选择影响土壤有效系数的 7 个因子,然后依次确定各因子的权重系数(见表 4),最后加权求和指数法计算分县土壤有效系数。计算公式为:

$$f(S) = \sum_{i=1}^n W_i P_i$$

式中, $f(S)$ 为土壤有效系数, W_i 为第 i 个评价指标的权重; P_i 为第 i 个评价指标的分值。

表 4 各因子权重系数
Table 4 Weight of factors

指标 Factor	权重 W_i
pH 值 pH value	12
有机质 OM	26
速效磷 Available P	12
速效钾 Available K	12
碱解氮 Alkali-hydrolyzable N	14
坡向 Slope direction	9
坡度 Slope gradient	15

3 研究方案及步骤

3.1 光合生产潜力的计算

太阳总辐射是影响土地生产潜力的重要因素,也是计算土地生产潜力的第一步(即光合生产潜力),本次在数据资料收集过程中,实测的太阳总辐射资料获取比较困难,加上太阳总辐射相对稳定,因此采用了《吉林省农业气候资源及农业气候区划》中的太阳总辐射和玉米光合生产潜力数据。

3.2 光温及气候生产潜力的计算

光温及气候生产潜力需要对光合生产潜力进行温度和水分订正。为了得到光温及气候生产潜力的空间分布特征,首先需要对气象站点定位观测的气象数据进行空间插值,模拟其空间变异情况。目前常用的空间化方法有克里金插值法(Kriging)、泰森多边形法(Thiessen Polygons)、逆距离加权法(Inverse Distance Weight)、样条法(Splines)等等。近年来,也有一些学者提出在地形复杂地区通过增加不同的地形变量,考虑经纬度、海拔高度、坡度、坡向、坡面连续性以及其他微地形地貌和特征因子,并利用多元逐步回归方法^[5]、ANUSPLIN 模型^[6,7]、PRISM 模型^[8]等算法进行空间插值,还有将多元回归分析和常规插值相结合的方法^[9],这些新方法的尝试均取得了较好的效果。本次采用多元回归 + 残差内插相结合方法,对吉林省气象站点观测数据进行了空间模拟。基于“多元回归 + 内插残差”的气象数据空间化步骤为:首先以气象站实测的气象数据为输出变量,以气象站的经度、纬度、海拔高度、坡度、坡向和地形遮蔽度等为输入变量进行多元回归分析并建立回归方程,同时得到每个气象站的残差。然后用回归方程计算各气象站的气象数据(规律性部分),同时用空间内插方法对残差进行空间插值,得到栅格

化的残差。将残差进行空间插值后再加上回归方程的计算结果即得到栅格化的气象数据。

气象数据采用国家气象中心气候资料室提供的 2005 年 1~12 月份全国旬平均气温及降水数据,内容包括站点号、气温和降水数据。利用国家气象中心另外提供的包含吉林气象站点号、站点名称以及经纬度的数据,提取出 5~9 月份的吉林省 45 个基本气象站点的旬平均气温和降水资料,这些气象站点基本上能够满足一个区、县有一个气象站点的情况。选取 40 个气象站点的数据用于建立降水的空

间分布模型,并同时选取了在空间分布上相对均匀的其余 5 个气象站点的数据用于模型的验证。

表 5 为气温与其他要素的多元线性回归结果,可见 5~9 月份的气温回归模拟的复相关系数在 0.877~0.963 之间变化,9 月份最低,5 月份最高,经度、纬度和海拔高度是影响吉林省地区气温的重要因素,其他如坡度、坡向和地形遮蔽度与气温的相关性普遍不高。在不同月份,它们的影响程度也有较大差异。

表 5 5~9 月份气温与其他要素的多元线性回归结果

Table 5 Multiple linear regression results for temperature from May to September

月份 Month	回归方程 Regression equation	复相关系数 Multiple correlation coefficient
5	$Y = 994.015 - 5.167X_1 - 4.552X_2 - 0.04X_3 - 0.693X_4 - 0.003X_5 - 0.095X_6$	$R = 0.963$
6	$Y = 996.251 - 6.051X_1 - 0.677X_2 - 0.032X_3 - 0.475X_4 - 0.011X_5 - 0.049X_6$	$R = 0.927$
7	$Y = 777.104 - 4.605X_1 + 0.844X_2 - 0.028X_3 + 0.122X_4 - 0.001X_5 - 0.05X_6$	$R = 0.944$
8	$Y = 505.866 - 1.091X_1 - 2.673X_2 - 0.045X_3 + 0.008X_4 + 0.001X_5 - 0.062X_6$	$R = 0.922$
9	$Y = 505.09 - 1.316X_1 - 2.657X_2 - 0.055X_3 - 0.149X_4 - 0.155X_6$	$R = 0.877$

注:表中的 X_1 为经度, X_2 为纬度, X_3 为海拔高度 (DEM), X_4 为坡度, X_5 为坡向, X_6 为地形遮蔽度。下同。

Note: X_1 , Longitude; X_2 , Latitude; X_3 , Elevation; X_4 , Slope gradient; X_5 , Slope direction; X_6 , Degree of terrain coverage. The same as below.

表 6 为降水与其他要素的多元线性回归结果,可见 5~9 月份的降水量回归模拟的复相关系数在 0.534~0.923 之间变化,9 月份最低,5 月份最高,经

纬度、海拔高度和坡度是影响吉林省地区降水量的重要因素,其次是坡向和地形遮蔽度。在不同月份,它们的影响程度也有较大差异。

表 6 5~9 月份降水与其他要素的多元线性回归结果

Table 6 Multiple linear regression results for precipitation from May to September

月份 Month	回归方程 Regression equation	复相关系数 Multiple correlation coefficient
5	$Y = -5426.74 + 91.534X_1 - 121.699X_2 + 0.153X_3 + 19.493X_4 - 0.125X_5 - 0.667X_6$	$R = 0.923$
6	$Y = 12590.474 - 107.553X_1 + 51.289X_2 + 0.989X_3 - 17.581X_4 + 1.435X_5 - 3.477X_6$	$R = 0.715$
7	$Y = 37825.873 - 79.556X_1 - 597.907X_2 - 0.29X_3 + 62.86X_4 - 2.057X_5 - 0.224X_6$	$R = 0.804$
8	$Y = 23258.943 - 77.655X_1 - 261.748X_2 + 1.134X_3 + 45.887X_4 + 0.076X_5 - 3.047X_6$	$R = 0.744$
9	$Y = -271.538 + 39.112X_1 - 92.712X_2 - 0.359X_3 - 23.668X_4 + 0.063X_5 + 0.123X_6$	$R = 0.534$

在上述多元线性回归模型的基础上,利用气温及降水量的实际值减去多元线性回归模型的模拟值计算出吉林省各气象站点 5~9 月份气温及降水量的残差。在一定距离范围内,降水量残差的半方差值是随着距离的增加而增加的,呈正相关关系的,而当大于这个距离时,半方差值趋于稳定,表明降水量残差具有一定的空间相关性。气温及降水量残差的半方差函数适用采用克里金插值方法,然后通过选择适当的模型及其参数实现了吉林省各季节降水量

残差的方差空间分布。

在 ARCGIS 的空间分析模块下,将残差空间插值结果与回归方程计算结果相加得到研究区域 1 km × 1 km 分辨率的 5~9 月份气温及降水空间模拟数据(见图 1)。

最后,利用各个月份的温度和降水量空间分布模拟图,结合玉米不同生育期的温度、水分订正系数,利用 GIS 计算得到研究区域 1 km × 1 km 分辨率的光温生产潜力及气候生产潜力空间模拟数据。

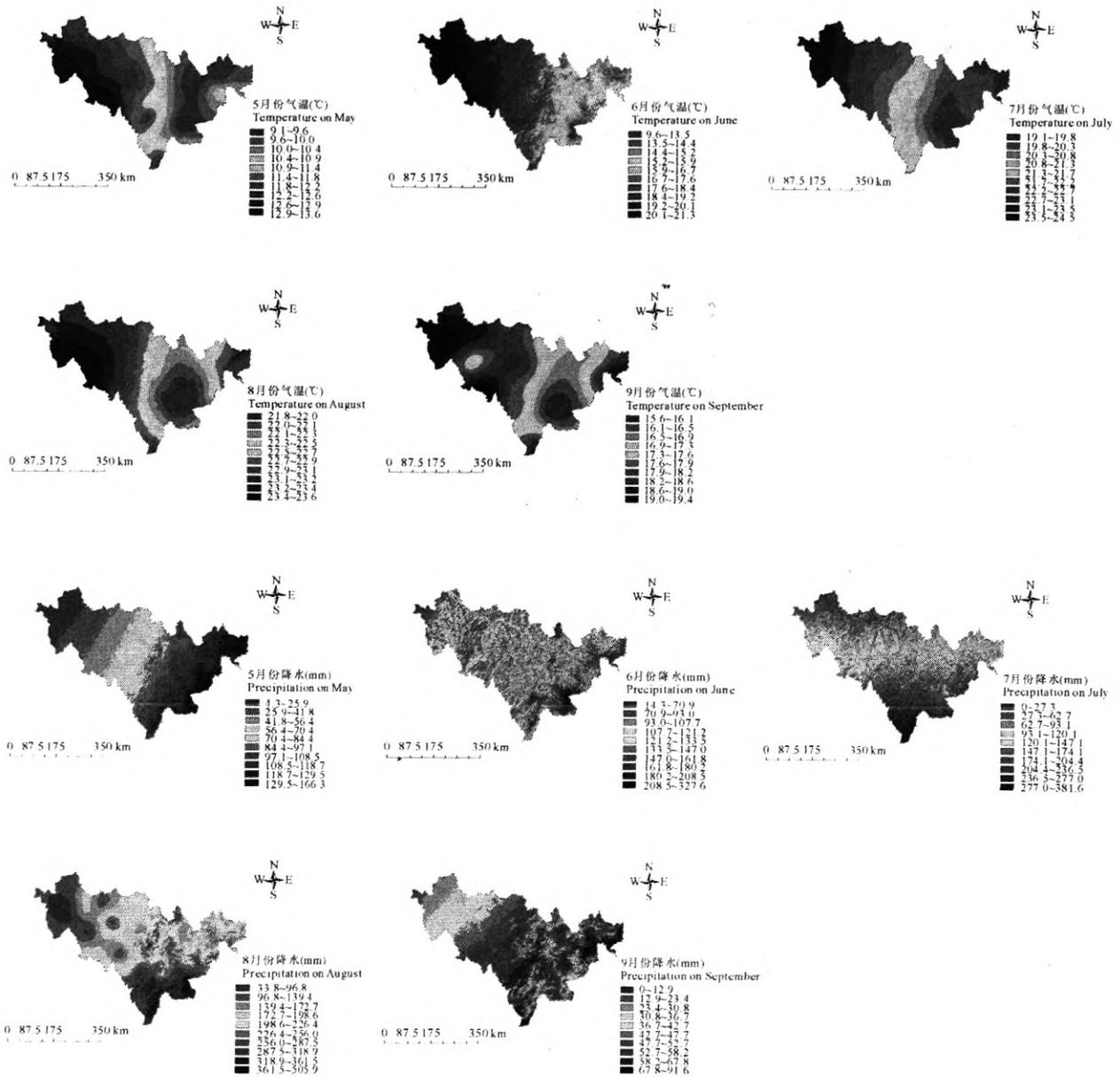


图 1 5~9 月份降水量及气温分布

Fig. 1 Gridded seasonal precipitation and temperature surfaces from May to September

3.3 土地生产潜力的计算

土地生产潜力需要对气候生产潜力进行土壤有效系数订正。由于田间土壤周围自然地理条件和环境信息的复杂性和不确定性,大尺度区域的土壤属性空间模拟数据较难获取。影响土壤有效系数中 pH 值、有机质、速效钾、碱解氮和速效磷的因素很多,其中土壤的其他相关性状被作为众多研究中的影响因子。土壤 pH 值、有机质、速效钾、碱解氮和速效磷含量与土壤粘粒及其他元素含量可能存在一定程度的相关性这一点,已经成为大多研究学者所关注的热点^[10]。已有研究表明,不同坡向、坡度及

海拔高度具有不同的水热分配条件和物质移动堆积的特点,地貌差异、土壤类型和土地利用方式对土壤养分元素的分布也有一定的影响^[11,12];因此,为得到较好的土壤养分空间分布结果,对土壤中 pH 值、有机质、速效钾、碱解氮和速效磷元素的影响因素进行分析,将这几种元素与经度、纬度、DEM、坡度、坡向、地形遮蔽度等地理要素进行相关性分析,与有效硼(B),有效钙(Ca),有效镁(Mg),有效铜(Cu)和有效锌(Zn)等微量元素进行相关性分析。然后,利用 ARCGIS 的地统计分析模块,采用基于土壤类型和微量元素的 Cokriging 插值方法对土壤 pH 值、有机质、速效钾、碱解氮和速效磷元素进行空间插值。

本次调查在收集第二次土壤普查资料数据和土壤肥力监测资料数据的基础上,考虑土地利用、土壤类型以及地形格局的分布特点,在 2005 年采用网状均匀布点模式,采样间隔为 10 km × 10 km,利用 GPS 进行实地样点空间定位,并根据吉林省地区土壤类型图与地形地貌等实际情况调整采样点的位置,在山地丘陵地区或根据采样点之间土壤类型不同而适当补加采样点,以便使样点在空间上具有广泛的代表性。每一个样点都按农化样的采样要求在直径 100 m 范围内选择 3~5 个点,混合按四分法采集样品。共采集 144 个样点 0~20 cm 表层土壤混合样品。采用土壤养分状况系统研究法(ASI 法)进行土壤样品的测试分析,得到 pH 值、有机质、氮、磷、钾、中微量元素等土壤化验数据。

应用 SPSS14.0 统计软件,采用对数转化、域法处理(样本平均值)、Box-Cox 转化 3 种数据处理方法和柯尔莫哥洛夫-斯蜜诺夫检验(K-S 检验),计算样本偏度、峰度和 K-S 等参数,并对其是否服从正态分布进行检验。

变异系数的大小表示土壤特性空间变异型的大小,变异系数 < 10% 时为弱变异性, > 100% 时为强变异性,位于二者之间是中等变异性。从表 7 可知,研究区域土壤中土壤养分变异系数都较大,这说明这些元素的分布存在一定的空间变异性,且除了速效磷属于强变异类型之外,其他都属于中等变异类型。

表 7 土壤养分含量描述性统计结果

Table 7 Statistical feature values of soil elements

元素 Element	样本数 Number of samples	均值 (mg/L) Average	标准差 Standard deviation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 (%) Coefficient of variation
pH 值 pH value	144	7.425	1.203	-0.633	2.147	16.196
有机质 OM	144	1.458	1.155	1.066	3.462	79.229
速效磷 Available P	144	14.542	17.625	5.040	38.292	121.201
速效钾 Available K	144	82.326	42.967	2.427	10.246	52.191
碱解氮 Available NH ₄	144	12.223	9.442	2.465	12.393	77.247

由于原始数据集的概率分布表现出强的偏斜效应,因此,在地统计学和插值分析之前必须进行数据转化。为了获取更为准确的插值源数据,对原始数据分别进行了对数变化、域法处理和 Box-Cox 转化,并对这些数据进行了 K-S 检验,通过比较 K-S

检验的显著水平(K-S P)选择最好的处理方式。研究发现,pH 值原始数据很好的符合正态分布,而有机质、速效磷、速效钾和碱解氮经过对数转换变化后达到最佳效果。因此,采用有机质、速效磷、速效钾和碱解氮经过对数转换变化后的数据用于 Kriging 插值,而 pH 值采用原始数据。

通过 ArcGIS 提取出研究区地理坐标(经纬度)、DEM、坡度、坡向、剖面曲率和平面曲率的属性值,利用 SPSS 计算这些地形因子与 pH 值、有机质、速效钾、碱解氮和速效磷等土壤养分的 pearson 简单相关系数。结果表明(见表 8),土壤养分变量和地形变量之间存在着较为显著的相关关系,尤其是 pH 值、有机质、碱解氮和速效磷与经度、纬度之间存在着显著相关关系;但是土壤养分要素与 DEM、坡度、坡向、剖面曲率和平面曲率地形变量之间的相关性不明显,不是土壤养分空间分布差异的主要因素。其中,就经度而言,有机质、碱解氮和经度呈正相关,即研究区越往东部,有机质和碱解氮的含量也越高,反之越低;而 pH 值则相反,与经度呈显著负相关关系;就纬度而言,碱解氮、速效磷和纬度呈正相关,即研究区越往北部,碱解氮和速效磷的含量也越高,反之越低;而 pH 值则相反,与纬度呈显著正相关关系。

吉林省土壤各要素或性状之间的相关性分析表明(见表 9),土壤中 pH 值、有机质、速效钾、碱解氮和速效磷元素与某些微量元素存在一定的相关性。其中,土壤中 pH 值与有效 Fe、有效 Mn、和速效氮的呈显著负相关,分别为 -0.708、-0.702 和 -0.666。有机质与 pH 值、有效 Ca、有效 Mn 等元素具有较高的相关性,与 pH 值呈现负相关,与有效 Ca、有效 Mn 等元素为正相关。碱解氮除了与 pH 值具有显著负相关之外,与有效 Fe 和有效 Zn 具有较高的正相关关系。速效磷与速效钾、有效 Zn 呈显著正相关。因此,与 pH 值、有机质、速效钾、碱解氮和速效磷这些元素相关性较高的地理要素和微量元素可以作为协因子参与协克里金插值分析。

众所周知,土壤类型对于土壤养分含量的空间分布具有重要影响。因此,首先利用 GIS 将 1:100 万土壤类型图与采样点分布图叠置,计算落在同一土壤类型斑块内各采样点的土壤 pH 值、有机质、速效钾、碱解氮和速效磷的平均值,并生成 1 km × 1 km 基于不同土壤类型的土壤 pH 值、有机质、速效钾、碱解氮和速效磷平均值栅格数据(为描述简便起见,将这五种平均值栅格数据依次称为 A、B、C、D、E)。基于上述相关性分析结果,分别以 A 为辅助数据对

各采样点的 pH 值进行 Cokriging 插值分析,以 A 为辅助信息对各采样点的有机质进行 Cokriging 插值、选择各采样点的速效磷和 C 作为辅助信息对各采样点的速效钾进行 Cokriging 插值、选择各采样点 pH 值和 D 作为辅助信息对各采样点的碱解氮数据进行 Cokriging 插值、选择各采样点有效锌(Zn)和 E 作为辅助信息对各采样点的速效磷数据进行 Cokriging 插值。分析还发现,采用以上相关要素的 Cokriging 插值方法的精度均优于采用海拔高度、坡度、坡向等其他要素作为辅助信息的 Cokriging 插值。根据模型选择的评判标准,通过对表中各个拟合参数进行

比较发现,选择 Gaussian 模型拟和土壤 pH 和有机质含量、J-Bessel 模型拟和速效钾、Stable 模型拟和碱解氮和速效磷比较合适。从普通 Kriging 插值、基于土壤类型和微量元素的 Cokriging 插值分析的交叉检验和检验站验证结果发现,利用辅助变量的 Cokriging 插值在增加估值精度方面具有较为明显的优势,插值结果优于普通 Kriging 插值。因此,在大区域、较为复杂的地理环境背景下进行农田土壤属性空间估值时,Cokriging 插值是一种值得考虑和推荐使用的方法(见图 2)。

表 8 土壤养分与地形因子相关性分析

Table 8 Correlation among soil properties and topography factors

项目 Item	经度 Longitude	纬度 Latitude	坡向 Slope direction	DEM	坡度 Slope gradient	平面曲率 Plane curvature	剖面曲率 Profile curvature
pH	-0.660**	0.495**	-0.008	-0.048	0.018	-0.200*	0.101
有机质 OM	0.546**	-0.158	0.040	0.056	0.020	0.079	-0.019
速效磷 Available P	0.307**	-0.286**	0.016	0.035	0.005	-0.011	0.045
速效钾 Available K	0.110	-0.153	0.012	0.011	0.006	-0.071	0.081
碱解氮 Available NH ₄	0.566**	-0.573**	0.094	0.127	0.071	0.083	-0.035

注: * 经过信度 5% 的检验; ** 经过信度 1% 的检验。下同。

Note: * Means correlation is significant at the 0.05 level, while ** means correlation is significant at the 0.01 level. The same as below.

最后,利用基于土壤类型和微量元素辅助信息进行空间插值方法得到的 1 km × 1 km 分辨率的土壤 pH 值、有机质、速效钾、碱解氮和速效磷元素空

间模拟数据,结合土地生产潜力的土壤有效系数,利用 GIS 计算得到研究区域 1 km × 1 km 分辨率的土地生产潜力空间模拟数据。

表 9 土壤各要素相关性分析

Table 9 Correlation among soil properties

要素 Properties	pH	OM	Aa	Ca	Mg	Available K	Available N	Available P	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
pH	1.00	-0.578**	-0.576**	0.02	-0.09	-0.05	-0.666**	-0.307**	-0.351**	0.302**	-0.525**	-0.708**	-0.702**	-0.595**
OM	-0.578**	1.00	0.215**	0.560**	0.405**	0.13	0.326**	0.208*	0.169*	-0.15	0.516**	0.333**	0.524**	0.425**
Aa	-0.576**	0.215**	1.00	-0.196*	-0.07	-0.09	0.474**	0.16	0.397**	-0.11	0.227**	0.602**	0.353**	0.307**
Ca	0.02	0.560**	-0.196*	1.00	0.484**	-0.11	-0.04	-0.178*	-0.11	0.01	0.09	-0.241**	0.03	-0.02
Mg	-0.09	0.405**	-0.07	0.484**	1.00	0.04	0.08	-0.05	-0.02	0.02	0.318**	-0.05	0.222**	0.08
Available K	-0.05	0.13	-0.09	-0.11	0.04	1.00	0.07	0.674**	-0.01	0.10	0.297**	0.14	0.11	0.474**
Available N	-0.666**	0.326**	0.474**	-0.04	0.08	0.07	1.00	0.237**	0.340**	-0.09	0.360**	0.558**	0.451**	0.539**
Available P	-0.307**	0.208*	0.16	-0.178*	-0.05	0.674**	0.237**	1.00	0.12	-0.07	0.476**	0.375**	0.176*	0.638**
S	-0.351**	0.169*	0.397**	-0.11	-0.02	-0.01	0.340**	0.12	1.00	0.11	0.249**	0.457**	0.14	0.305**
B	0.302**	-0.15	-0.11	0.01	0.02	0.10	-0.09	-0.07	0.11	1.00	-0.10	-0.187*	-0.14	-0.13
Cu	-0.525**	0.516**	0.227**	0.09	0.318**	0.297**	0.360**	0.476**	0.249**	-0.10	1.00	0.508**	0.641**	0.603**
Fe	-0.708**	0.333**	0.602**	-0.241**	-0.05	0.14	0.558**	0.375**	0.457**	-0.187*	0.508**	1.00	0.529**	0.683**
Mn	-0.702**	0.524**	0.353**	0.03	0.222**	0.11	0.451**	0.176*	0.14	-0.14	0.641**	0.529**	1.00	0.454**
Zn	-0.595**	0.425**	0.307**	-0.02	0.08	0.474**	0.539**	0.638**	0.305**	-0.13	0.603**	0.683**	0.454**	1.00

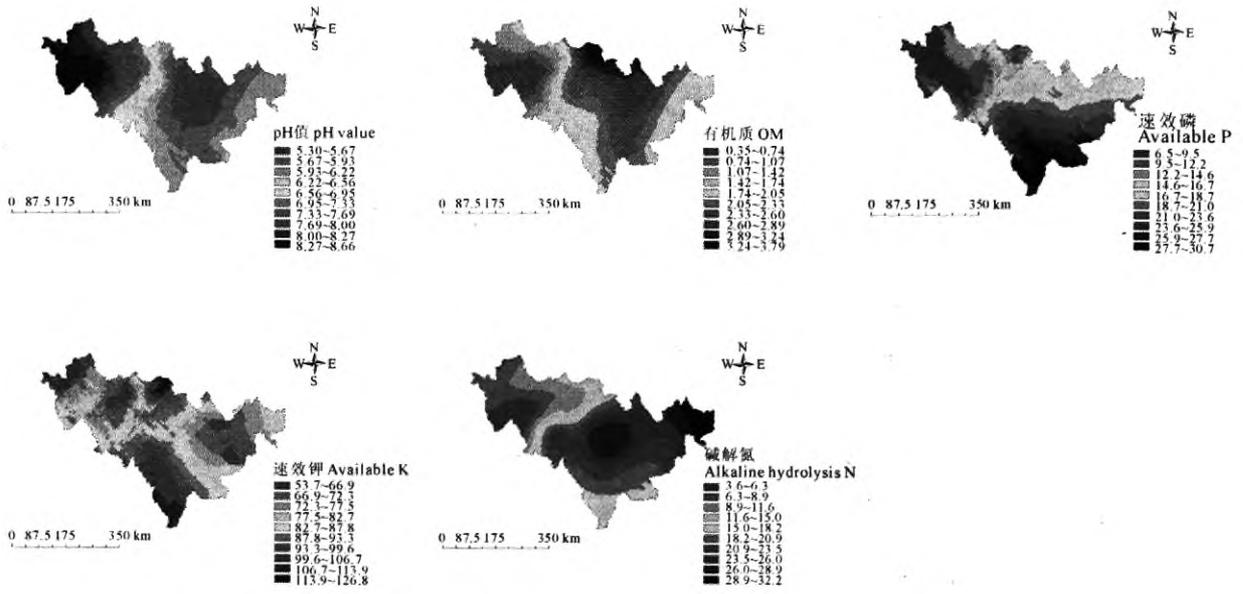


图 2 土壤 pH 值、有机质、速效钾、碱解氮和速效磷分布
Fig.2 Maps for soil pH, OM, available K, alkaline hydrolysis N and available P

4 结果与分析

将吉林省玉米各级生产潜力与吉林省农业综合分区图、行政区划数据叠加,分析玉米各级生产潜力的区域差异。从图 3 可知,吉林省的西部平原农牧区,中部平原农业区的松原市、前郭尔罗斯蒙古族自治县、长岭县、双辽县、梨树县大部分地区以及双安县和公主岭市北部地区是光合生产潜力较高的地区,而吉林省长白山地林农区的汪清县、珲春市、图们市、延吉市、龙井市、和龙市、安图县、长白朝鲜族自治县以及集安市北部地区则属于光合生产潜力较低的地区。吉林省光温生产潜力高值区与光合生产潜力高值区基本一致;光温生产潜力低值区除了分布在长白山地林农区的绝大部分地区外,其余主要分布在东部半山林农区的蛟河市东部和桦甸市东部地区。吉林省气候生产潜力高值区广泛分布在西部平原农牧区和中部平原农业区的大部分地区,以及东部半山林农区的西部。气候生产潜力低值区则主要分布在长白山地林农区和东部半山林农区的东部地区。吉林省玉米土地生产潜力高值区主要集中分布在中部平原农业区的榆树市、德惠县、九台市、公主岭市、梨树县和四平市地区;以及东部半山林农区的舒兰市北部、永吉县北部、长春市、伊通满族自治县、东辽县、辽源市、东丰县、梅河口市和磐石县地区。玉米土地生产潜力低值区则广泛分布在除此以外的其他地区。

5 结论

1) 借助地理信息系统的强大的空间分析功能、数理统计方法和地统计学等较为严谨的数学理论模型,整合了已有地面台站观测、野外观测、实验室模拟与理化分析等不同数据来源的时空数据,对于玉米土地生气潜力研究所需要的气象观测数据、土壤养分采样数据等进行空间化处理,并且通过建立气象要素、土壤要素、与其他海拔高程、坡度、坡向、土壤性质等辅助地理要素的空间模型,获取具有较高空间分辨率,与实际情况比较吻合的气象、土壤空间分布数据,并利用温度、水分、土壤等订正系数获取 1 km × 1 km 分辨率的作物各级生产潜力空间模拟数据,精度方面较已有的研究有一定程度的提高,解决了以往生产潜力以点带面、按照行政区域等较大潜力单元计算生产潜力的弊端。估算结果表明,研究区玉米的土地生产潜力与现实生产力有很大差距,这表明现实生产力还有很大的提高余地;同时较为精确的玉米各级生产潜力的模拟,将有利于指导如何最佳利用光能、气候、土壤等条件,指导如何开展土地整理、中低产田改造等工作来改善玉米生产,实现资源可持续利用。

2) 本文中的作物生产潜力没有考虑具体的农业生产条件与措施,也未考虑自然灾害的影响。

在土地生产潜力的基础上,进一步将灌溉、化肥、农业机械等社会经济要素进行空间化模拟,并利

用社会有效系数计算出玉米的社会生产潜力,是本 研究下一步即将开展的工作。

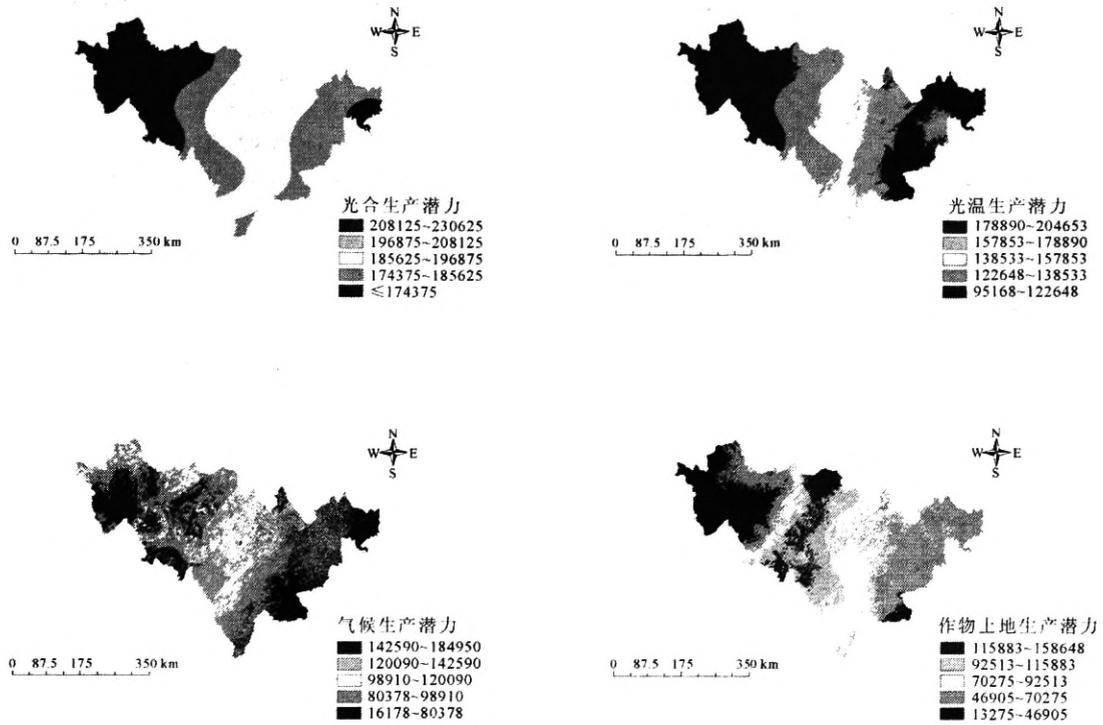


图 3 玉米各级生产潜力空间分布(kg/hm²)

Fig.3 Spatial distribution of maize land potential productivity of different level

参 考 文 献:

[1] 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.

[2] 党安荣,阎守邕,吴宏歧,等.基于GIS的中国土地生产潜力研究[J].生态学报,2000,20(6):910—915.

[3] 朱 蕾,黄敬峰.基于GIS和空间插值技术的南方丘陵山区土地生产潜力估算[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2007,33(4):458—465.

[4] 马树庆.东北区农业气候土壤资源潜力及其开发利用研究[J].地理科学,1995,15(3):243—252.

[5] 舒守娟,喻自凤,王 元,等.西藏地区复杂地形下的降水空间分布估算模型[J].地球物理学报,2005,48(3):535—542.

[6] Hutchinson M F, Dowling T I. A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia[J]. Hydrological Processes,1991,5:45—58.

[7] Hutchinson M F, Gessler P E. Splines-more than just a smooth interpolator[J].Geoderma,1994,62:45—67.

[8] Daly C, Helmer E H, quinones M. Mapping the climate of puerto rico, vieques and culebra[J].International Journal of Climatology,2003,23:1359—1381.

[9] 廖顺宝,李泽辉.基于GIS的定位观测数据空间化[J].地理科学进展,2003,22(1):87—93.

[10] 吴乐知,蔡祖聪.中国土壤有机质含量变异性与空间尺度的关系[J].地球科学进展,2006,21(9):965—972.

[11] 秦 松,樊 燕,刘洪斌,等.地形因子与土壤养分空间分布的相关性研究[J].水土保持研究,2008,15(1):46—52.

[12] 王宗明,张 柏,宋开山,等.东北平原典型农业县农田土壤养分空间分布影响因素分析[J].水土保持学报,2007,21(2):73—77.

Study on land productivity potential of maize in Jilin Province based on spatial interpolation technique and auxiliary information

SHI Shu-qin², CHEN You-qi^{1,3}, LI Zheng-guo^{1,3},
YANG Peng^{1,3}, WU Wen-bin^{1,3}, TANG Fang⁴

(1. School of Management, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. Key Laboratory of Resources Remote-Sensing & Digital Agriculture of Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China;

3. Institute of Agricultural Resources & Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences,

Beijing 100081; 4. Wuhan Land Reserve and Management Center, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: In this study, by using spatial analysis function of ArcGIS software, a crop productivity potential model originally from an attenuation model has been developed to assess maize land productivity potential in Jilin Province located in northeast China. Moreover, spatial interpolation technique and auxiliary information are used for spatial modeling of key climate and soil conditions, which are required in simulating light and temperature potential productivity. First, temperature and precipitation data observed from climate data stations in Jilin are interpolated by using an integrated means of multiple regression and residual error interpolation. Second, with a consideration of soil type information, the relevant factors are utilized as co-factors for interpolating soil properties (i.e. soil pH, soil organic matter, available K, alkali-hydrolyzable N and available P) by using the means of Cokriging technique. Finally, based on temperature, moisture and soil correction coefficients, the maize land productivity potential in Jilin are reclassified and zoned into different yield levels.

Keywords: potential land productivity; spatial interpolation; auxiliary information; GIS

(上接第 177 页)

- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 169—171, 189—190.
- [17] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 192—193.
- [18] 吴刚, 李金英, 曾晓舵. 土壤钙的生物有效性及与其它元素的相互作用[J]. 土壤与环境, 2002, 11(3): 319—322.
- [19] 杨锋, 谢建茂, 黄小芳, 等. 福建中南部蔬菜地土壤养分状况分析[J]. 中国农学通报, 2006, 11(22): 218—220.
- [20] 科夫达 B A. 土壤学原理(上)[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 282—283.

Study on impact of nitrogen supply on exchangeable calcium content of calcareous soil

XU Hai, WANG Yi-quan, WANG Hao, XU Shuang, WANG Yong-jian, LI Peng

(College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To reveal “sub-healthy” phenomenon, which brought with continually increasing of chemicals using into soil, and to renew the traditional concept that calcareous soil would not appear the phenomenon of calcium lack, an experiment was conducted to analyse the impact of NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4NO_3 and urea treatment on exchangeable calcium content of calcareous soil. The result indicated: soil exchangeable calcium content presented various degree of decline after calcareous soil was drip washed by same volume and different concentration NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4NO_3 solutions, and the impact of the same equivalent NH_4^+ , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ solution on soil exchangeable calcium was relatively larger than that of NH_4Cl solution and NH_4NO_3 solution, the degree of relation was: $\text{NH}_4\text{NO}_3 < \text{NH}_4\text{Cl} < (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$; when urea was executed into soil sample to cultivate, the soil exchangeable calcium content assumed remarkable inverse correlation with time within 7 days, but it tended to be steady after that. The research conclusion: the massive and long-term chemistry nitrogenous fertilizer employment caused the exchangeable calcium content in surface layer calcareous soil to reduce gradually, there was weak-decalcification phenomenon, and all degree of calcium saturation dropped to 50% or less, and the soil presented “sub-healthy” condition.

Keywords: calcareous soil; nitrogen; exchangeable calcium; degree of calcium saturation