

# 滨海平原区耕地产能评价及其影响因素分析 ——以河北省黄骅市为例

杜海童<sup>1</sup>, 崔江慧<sup>2</sup>, 哈 凯<sup>1</sup>, 门明新<sup>1</sup>

(1. 河北农业大学 国土资源学院, 河北 保定 071000; 2. 河北农业大学 农学院, 河北 保定 071000)

**摘要:** 构建耕地产能评价指标体系, 分析耕地产能空间分异规律, 探讨各因子对耕地产能空间格局影响的作用, 对耕地资源数量质量并重管理、落实耕地占补平衡制度等有着重要的意义。本文以河北省黄骅市为研究区, 构建耕地产能评价指标体系, 采用逐级修正法对耕地产能进行评价, 引入地理探测器模型, 对河北省黄骅市耕地产能空间格局的特征及影响因素进行分析探讨。研究表明: (1) 黄骅市耕地产能指数的范围为 829.48 ~ 2 379.22, 呈现出明显的区域特征。(2) 盐渍化程度和灌溉保证率是决定黄骅市耕地产能空间格局的最主要因子。(3) 各因子之间具有交互作用, 主要表现为协同作用和非线性协同作用。在交互作用中, 盐渍化程度和灌溉保证率之间的交互作用最强, 空间格局的影响力  $q$  值为 0.615。

**关键词:** 耕地产能评价; 地理探测器; 黄骅市

中图分类号: S9; F301.24

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文献标志码: A



## Evaluation of cultivated land productivity and analysis of its influencing factors in coastal plain area

### —— A case study of the Huanghua city in Hebei province

DU Haitong<sup>1</sup>, CUI Jianghui<sup>2</sup>, HA Kai<sup>1</sup>, MEN Mingxin<sup>1</sup>

(1. College of Resource and Environmental Science, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China;

2. College of Agriculture, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China)

**Abstract:** By constructing the evaluation index system of cultivated land productivity, this paper analyzes the law of spatial differentiation of cultivated land capacity, and probes into the relationship among the different influence of various factors on cultivated land productivity, which is of great significance to the management of the quantity and quality of cultivated land resources and the implementation of the balance system of cultivated land occupation and repair. Taking Huanghua city of Hebei province as an example, the study constructs the evaluation index system of cultivated land productivity, evaluates the cultivated land productivity of Huanghua city by step correction method, and introduces a geographical detector model to evaluate the productivity of cultivated land in Huanghua city, Hebei province. The characteristics and influencing factors of cultivated land productivity spatial pattern in Huanghua city Hebei province were discussed. The results show that: (1) The cultivated land productivity index of Huanghua city

收稿日期: 2019-03-20

基金项目: 国土资源部两套指标体系试点项目(20170411).

第一作者: 杜海童(1993-), 男, 河北任丘市人, 硕士研究生, 从事土地资源利用研究.

通信作者: 门明新(1974-), 男, 河北南皮县人, 教授, 从事景观生态和土地资源可持续利用研究. E-mail: menmingxin@163.com

ranges from 829.48 to 2 379.22, showing obvious regional characteristics. (2) The degree of salinization in the soil fertility level factor and the irrigation guarantee rate in the technical level factor are the most important factors in determining the spatial pattern of cultivated land productivity in Huanghua. (3) The main interaction between various factors are synergistic effect and nonlinear effect. Among the interactions, the interaction between salinization degree and irrigation assurance rate is the strongest, and the influence Q value of spatial pattern is 0.615.

**Keyword:** evaluation of arable land productivity; geographic detector; Huanghua city

耕地不仅是我国最为宝贵的资源,还是农业发展最主要的生产资料,耕地的好坏直接影响着国家粮食安全,是保障农民生产生活的基础<sup>[1-2]</sup>。2017年,中央4号文件《中共中央国务院关于加强耕地保护和改进占补平衡的意见》中明确提出,要着力加强耕地的数量、质量、生态“三位一体”保护,建立健全的耕地质量和耕地产能评价制度<sup>[3]</sup>。

耕地产能是农业生产力的具体表征,也是一定时期内社会生产力的重要组成部分,直观反映了一个国家和地区农业发展的经济实力和总体水平<sup>[4]</sup>。开展耕地产能评价研究,分析耕地产能空间分异规律,探讨各因子对耕地产能空间格局影响的作用关系,对耕地资源数量质量的并重管理、耕地的保护与动态监测、耕地占补平衡制度的落实等有着重要的意义。

基于农用地分等及农业统计的耕地产能计算方法、样地实验法、遥感估产法、农业生态区划法和实地调研法是目前常用的耕地产能评估方法。张凤荣等<sup>[5]</sup>采用样地实验法在种植制度基础上计算了耕地的粮食总生产能力;鄢文聚等<sup>[6]</sup>采用综合分析法,建立了基于农用地等指数的农用地产能核算技术方法体系;伍育鹏等<sup>[7]</sup>参考农用地分等模型,通过自然质量分的产量化表达,采用指数加权法、基于空间变异理论的克里金插值法来评估耕地产能;陈丽<sup>[8]</sup>应用农业生态区划法对土地生产潜力进行估算,探讨耕地质量内涵并对土地生产潜力加以耕地质量因子修正,进而对耕地产能进行核算;宋戈等<sup>[9]</sup>采用潜力衰减法对东北粮食主产区的耕地产能进行的核算;史舟等<sup>[10]</sup>利用农业遥感技术,分析遥感数据与农作物产量之间的统计关系,进而估算了耕地产能;陈东湘等<sup>[11]</sup>利用遥感解译数据,在分等定级成果的基础上,根据耕地质量与耕地产量的统计关系构建了耕地产能变化指数。综上所述,传统的耕地产能评估方法取得了一定的进展,但仍存在土地整治项目产能评估精度低、多为数学模型估测缺乏系统性评价等不足。

本研究以河北省黄骅市为研究区,构建耕地产能评价指标体系,评价耕地产能指数,引入地理探测器模型,对河北省黄骅市耕地产能空间格局的特征及影响因素进行探讨,研究结果对保障区域粮食安全、落实占补平衡制度和扩展耕地数量、质量、生态全面管护内涵等具有重要意义。

## 1 研究区概况和数据来源

### 1.1 研究区概况

黄骅市地处渤海湾西岸,河北省东南部,坐标范围为东经117°05′~117°40′,北纬38°09′~38°39′。地理位置优越,黄骅市整体上地势平坦,是海河平原黑龙港流域的一部分,地势整体上从西南向东北缓缓倾斜,海拔高度在0~109 m之间,平均年降水量约为527 mm,濒临渤海,淡水资源短缺,咸水资源丰富,属典型的地下水漏斗区。土壤类型以潮土、盐土、沼泽土为主,土壤贫瘠,土壤盐渍化较严重。黄骅市的土地面积约2 391.36 km<sup>2</sup>,下管辖有3街道4镇7乡,总人口48万,以种植小麦和玉米为主,年均产量维持在20万t以上。

### 1.2 数据来源

本研究的主要数据来源包括:

空间数据:黄骅市数字高程数据(DEM)、黄骅市2017农用地分等变更成果。

社会经济数据:《黄骅市国民经济统计年鉴(2016)》。

其他数据:黄骅市第二次土壤普查数据、黄骅市2016年耕地地力评价数据、黄骅市2008—2014年测土配方施肥样点数据。

## 2 研究方法

采用逐级修正法对黄骅市耕地产能进行评价,借鉴农用地分等技术思路与方法,用光温(气候)生产潜力指数反映气候条件,作为耕地产能评价的基础,再用地力水平系数和技术水平系数进行修正。

## 2.1 指标体系确立的建立及权重确定

耕地产能不仅受气候、地形、母质、生物和时间等五大因素的影响, 同样也受人为因素的强烈影响<sup>[12]</sup>。耕地产能评价结果一方面需要体现自然条件完全满足以及受到土壤因素的条件约束下耕地所能达到的生产力水平, 另一方面要体现人为管理措施对耕地生产力水平的约束。

依据指标体系选取的科学性、综合性、稳定性和易获取性原则, 通过研读相关文献中指标体系的设计, 在把握耕地产能内涵的情况下, 结合黄骅市实际情况, 从气候条件、地力水平以及技术水平 3 个方面选取了 18 项指标, 并采用层次分析法确定指标权重, 构建了黄骅市耕地产能评价指标体系(表 1)。

表 1 耕地产能评价指标体系及指标权重

Table 1 Evaluation index system and weight of cultivated land productivity

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	权重 Weight
耕 地 产 能 指 标 体 系	气候条件	光温(气候)生产潜力	-
		地形部位 X1	0.05
		田面坡度 X2	0.02
		有效土层厚度 X3	0.02
		有机质含量 X4	0.15
		耕层质地 X5	0.20
		障碍层距地表深度 X6	0.02
		土体构型 X7	0.12
		土壤容重 X8	0.05
		土壤养分元素 X9	0.15
		砾石含量 X10	0.02
		盐渍化程度 X11	0.20
		灌溉保证率 X12	0.13
	排水条件 X13	0.30	
	地力水平	农田防洪标准 X14	0.10
		农机装备 X15	0.12
		病虫害防治水平 X16	0.15
农艺管理 X17		0.20	
技术水平			

## 2.2 指标数据标准化

指标数据的去量纲化处理采用极值标准化法, 其公式如下:

$$I_i = \frac{(X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (1)$$

其中,  $I_i$  为耕地评价单元的标准化分值;  $X_i$  为

因子的原始指标数据值,  $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$  分别为第  $i$  类指标因子中的极小值与极大值。

## 2.3 耕地产能指数计算方法

2.3.1 光温(气候)生产潜力指数 通过查询《农用地质量分等规程》得知, 黄骅市耕作制度属于“ I 402 运东滨海平原冬小麦—夏玉米一年两熟区”, 指定作物为冬小麦、夏玉米, 冬小麦光温(气候)生产潜力为 1267(373), 夏玉米光温(气候)生产潜力为 2605(2017)。

### 2.3.2 计算地力水平系数

地力水平系数主要反映耕地的自然质量状况。计算公式如下:

$$q = \sum_{i=1}^n W_i f_i / 100 \quad (2)$$

式中:  $q$  为地力水平系数;  $W_i$  为技术水平二级指标标准化分值;  $f_i$  为二级指标权重。

2.3.3 计算技术水平系数 技术水平是将耕地潜在的产能转化为现实产能的关键因素, 决定了耕地实际产量的高低, 技术水平系数是通过采用二级指标加权求和的方法获得。

$$t = \sum_{i=1}^n W_i f_i / 100 \quad (3)$$

式中,  $t$  为技术水平系数;  $W_i$  为技术水平二级指标标准化分值;  $f_i$  为二级指标权重。

2.3.4 计算耕地产能指数 耕地产能评价主要借鉴农用地分等过程, 以光温(气候)生产潜力指数反映气候条件, 并作为耕地产能评价的基础, 利用耕地质量中的地力水平系数和技术水平系数对其进行修正, 进而对耕地产能进行评价, 具体公式如下:

$$P = \alpha \times q \times t \quad (4)$$

式中,  $P$  为耕地产能综合指数;  $\alpha$  为光温(气候)生产潜力指数;  $q$  为地力水平系数;  $t$  为技术水平系数。

## 2.4 地理探测器分析

地理探测器是由王劲峰团队开发的一种探测空间分异性, 以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法, 其核心思想是: 地理事物存在于特定的空间位置, 影响其发展的环境因素在空间上存在差异, 如果环境因素的变化与地理事物在空间上具有显著的一致性, 那就决定了这种环境因素对地理事物发生和发展具有意义<sup>[13-14]</sup>。

2.4.1 因子探测 因子探测的主要用途为探测某一空间分布样点值  $Y$  的空间分异性, 探测某变量  $X$  能多大程度上揭示样点值得空间分异程度<sup>[15]</sup>, 并用  $q$  值来表示度量, 表达式如下:

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (5)$$

式中,  $L$ —样点值  $Y$  或者变量  $X$  的分层或分区数;  $N$ —全区的单元数;  $N_h$ — $h$  层的单元数;  $\sigma^2$ —全区的  $Y$  值方差;  $\sigma_h^2$ — $h$  层内  $Y$  值得方差。

$q$  取值于  $[0,1]$ ,  $q$  值越接近于 1 说明  $Y$  的空间分异性就越明显, 而且自变量  $X$  对样点值  $Y$  解释力越强, 极端情况当  $q=1$  时, 表示自变量  $X$  可以完全解释  $Y$  的空间分布; 相反  $q$  值越接近于 0 说明  $Y$  的空间分异性就越不明显, 自变量  $X$  对样点值  $Y$  解释力越弱, 极端情况当  $q=0$  时, 表示自变量  $X$  与  $Y$  的分布没有关系。

2.4.2 因子交互作用探测 交互作用探测器用于探测影响因素间是相互独立还是具有交互的作用, 即评估因子  $A$  和  $B$  共同作用时是否会增加或减弱对因变量耕地产能 ( $Y$ ) 的解释力, 或这些因子对耕地产能 ( $Y$ ) 的影响是相互独立的。通过比较单因子作用时两个因子的  $q$  值之和与双因子交互作用时的  $q$  值, 来判断两个因子的交互作用是对耕地产能的影响是加强了还是减弱了, 或者两个因子是独立起作用的<sup>[16]</sup>。具体如下:

- 协同作用:  $q(A \cap B) > q(A)$  或  $q(B)$ ;
- 双协同作用:  $q(A \cap B) > q(A)$  和  $q(B)$ ;
- 非线性协同作用:  $q(A \cap B) > q(A) + q(B)$ ;
- 拮抗作用:  $q(A \cap B) < q(A) + q(B)$ ;
- 单拮抗作用:  $q(A \cap B) < q(A)$  或  $q(B)$ ;
- 非线性拮抗作用:  $q(A \cap B) < q(A)$  和  $q(B)$ ;
- 相互独立:  $q(A \cap B) = q(A) + q(B)$ 。

### 3 结果与分析

#### 3.1 耕地产能评价结果及总体特征

3.1.1 地力水平系数计算结果 通过加权求和的方法计算得到地力水平系数, 通过计算可以看出 (见图 1), 黄骅市地力水平系数的范围为 0.63 ~ 0.93, 按照 0.2 分的等间距将质量系数划分 2 个区间。对研究区的耕地质量系数区间结果进行统计, 黄骅市地力水平系数为  $[0.8, 0.6)$  的面积是 24 527.00  $\text{hm}^2$ , 占耕地总面积的 31.81%, 地力水平系数为  $[1, 0.8)$  的面积是 52 575.93  $\text{hm}^2$ , 占耕地总面积的 68.19%。

黄骅市地力水平系数较高的区域主要分布在黄骅市西部和南部区域, 主要是这些区域的耕层质地、土体构型、土壤养分元素、盐渍化程度等综合条件

较好; 黄骅市地力水平系数较低的区域主要分布在黄骅市北部的齐家务乡和东部的南大港产业园区、中捷产业园区, 该区域的土壤耕层质地、土体构型及土壤养分元素等综合状况相对较差。

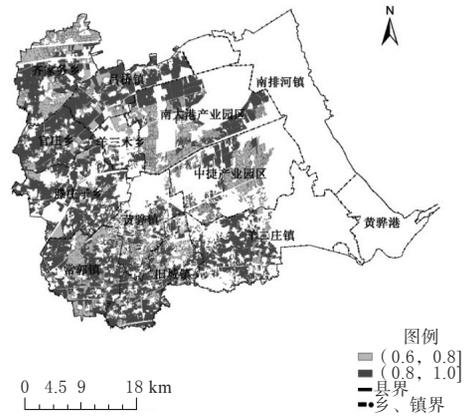


图 1 黄骅市地力水平系数

Fig.1 Geotechnical level coefficient of Huanghua city

3.1.2 技术水平系数计算结果 黄骅市技术水平系数的范围为 0.65 ~ 0.89, 按照 0.2 分的等间距将质量系数划分 2 个区间, 黄骅市技术水平系数为  $[0.8, 0.6)$  的面积是 68 982.95  $\text{hm}^2$ , 占耕地总面积的 89.47%, 质量系数为  $[1, 0.8)$  的面积是 8 119.98  $\text{hm}^2$ , 占耕地总面积的 10.53%, 见图 2。

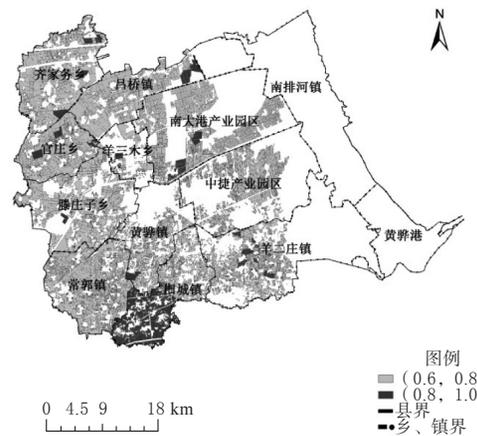


图 2 黄骅市技术水平系数

Fig.2 Technical level coefficient of Huanghua city

技术水平系数的高低主要由灌溉保证率和排水条件的两个因素的差异性引起, 从空间分布上来看, 黄骅市技术水平系数较高的区域主要分布在黄骅市南部的旧城镇及其他乡镇的零星分布, 该区域的灌溉保证率和排水条件等相对较好; 黄骅市技术水平系数较低的区域在各乡镇均有分布, 与旱地的分布区域大致相同, 灌溉保证率相对较差是导致该区域技术水平系数低的主要原因。

3.1.3 耕地产能指数评价结果 将地力水平系数和技术水平系数对光温(气候)生产潜力指数进行修正,计算得出黄骅市耕地产能指数的范围为 829.48 ~ 2 379.22,按照 600 分的等间距将产能指数划分 3 个区间,分别对应高等、中等和低等。整体上看,黄骅市耕地产能指数主要集中在中等和低等内,其中,低等面积最大,达到 59 505.16 hm<sup>2</sup>,占黄骅市耕地总面积的 77.17%,其次为中等,面积为 15 864.85 hm<sup>2</sup>,占黄骅市耕地总面积的 20.58%,产能指数面积最小的为高等,面积为 1 732.91 hm<sup>2</sup>,仅占黄骅市耕地总面积 2.25%。从不同地类来看,黄骅市水浇地产能指数大部分在高等范围内,占水浇地总面积的 85.77%。黄骅市旱地则大部分分布在低等范围,面积为 75 082.61 hm<sup>2</sup>,占旱地总面积的 79.25%。

从空间分布情况来看,耕地产能指数较高的区域与水浇地在黄骅市的分布基本吻合,并呈零星分布的特点,其中北部的齐家务乡、官庄乡、南大港产业园区分布相对集中,南部的羊二庄镇也有零星分布。耕地产能指数较低的区域与旱地在黄骅市的分布基本一致,主要集中在齐家务乡北部,中等产能区域主要集中在旧城镇、羊二庄镇等。

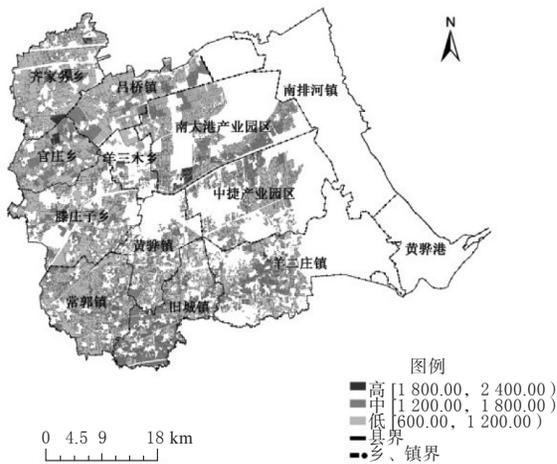


图 3 黄骅市耕地产能指数分布图

Fig.3 Distribution of cultivated land productivity index in Huanghua city

### 3.2 耕地产能地理探测器分析结果

3.2.1 耕地产能影响因素分析 根据黄骅市区位特点,在 Arc GIS 软件中采用网格法对研究区的耕地进行布点,将整个研究区域划分成单位面积为 4 km<sup>2</sup> 的 229 个网格,利用 GIS 的 Create Random Point 工具提取样点,分别得到 229 个样点的耕地产能指数和相应各影响因素的分值。

应用因子探测器分别诊断影响因子之间的相对重要性,即每个因子对耕地产能空间格局的影响力大小  $q$ ,排列顺序如下:灌溉保证率(0.413) > 盐渍化程度(0.344) > 土壤养分元素(0.236) > 土体构型(0.207) > 耕层质地(0.169) > 排水条件(0.117) > 有机质含量(0.106) > 砾石含量(0.034) > 障碍层距地表深度(0.026) > 农机装备(0.021) > 有效土层厚度(0.012) > 土壤容重(0.009) > 地形部位(0.008) > 病虫害防治水平(0.003) > 农田防洪标准(0.002) > 农艺管理(0.001) > 田面坡度(0.001)

从构建的耕地产能评价指标体系的各个准则层来看,各影响因子的空间格局的影响力如下:

地力水平因子:盐渍化程度(0.344) > 土壤养分元素(0.236) > 土体构型(0.207) > 耕层质地(0.169) > 有机质含量(0.106) > 砾石含量(0.034) > 障碍层距地表深度(0.026) > 有效土层厚度(0.012) > 土壤容重(0.009) > 地形部位(0.008) > 田面坡度(0.001)

技术水平因子:灌溉保证率(0.413) > 排水条件(0.117) > 农机装备(0.021) > 病虫害防治水平(0.003) > 农田防洪标准(0.002) > 农艺管理(0.001)。

表 2 耕地产能各因子  $q$  值

Table 2 Q value of each factor of cultivated land productivity

因子	$q$ 值	因子	$q$ 值
Factor	$q$	Factor	$q$
X1	0.008	X10	0.034
X2	0.001	X11	0.344
X3	0.012	X12	0.413
X4	0.106	X13	0.117
X5	0.169	X14	0.002
X6	0.026	X15	0.021
X7	0.207	X16	0.003
X8	0.009	X17	0.001
X9	0.236		

从各因子对耕地产能空间格局的影响力来看,灌溉保证率、盐渍化程度、土壤养分元素和土体构型的  $q$  值最大,分别为 0.413、0.344、0.236 和 0.207,且解释力均在 20% 以上,因此灌溉保证率、盐渍化程度、土壤养分元素和土体构型是影响黄骅市耕地产能空间分布的主要因素。砾石含量、障碍层距地表深度、农机装备、有效土层厚度、土壤容重、地形部位、病虫害防治水平、农田防洪标准、农艺管

理和田面坡度的解释力均在 10% 以下, 说明这些因子对黄骅市耕地产能空间格局只有很小的影响力, 在黄骅市范围内并无明显的差异。

3.2.2 耕地产能影响因素的交互作用 通过交互探测器探测各驱动因子之间对耕地产能的相互关系, 并对部分因子之间相互加强作用进行分析, 可以看出, 因子间的交互作用比单一因子在耕地产能中起

的作用更大, 且大部分因子交互  $q$  值都大于任何因子单独的  $q$  值, 因子互动效应呈现相互增强的关系。其中交互作用较强的包括: 盐渍化程度  $\cap$  灌溉保证率 (0.615) > 土体构型  $\cap$  灌溉保证率 (0.534) > 耕层质地  $\cap$  灌溉保证率 (0.521) > 土体构型  $\cap$  盐渍化程度 (0.514) > 盐渍化程度  $\cap$  排水条件 (0.500)。

表 3 因子交互作用  $q$  值及相应交互关系 (部分)

Table 3 Q value of factor interaction and corresponding interaction relationship (part)

$q(A \cap B)$	$q(A) + q(B)$	比较 comparison	交互关系 Interaction relationship
X11 $\cap$ X12=0.615	0.757	C>A 和 B	双协同作用
X7 $\cap$ X12=0.534	0.620	C>A 和 B	双协同作用
X5 $\cap$ X12=0.521	0.582	C>A 和 B	双协同作用
X7 $\cap$ X11=0.514	0.552	C>A 和 B	双协同作用
X11 $\cap$ X13=0.500	0.461	C>A+B	非线性协同作用
X1 $\cap$ X12=0.496	0.421	C>A+B	非线性协同作用
X4 $\cap$ X12=0.488	0.519	C>A 和 B	双协同作用
X5 $\cap$ X11=0.487	0.514	C>A 和 B	双协同作用
X12 $\cap$ X13=0.487	0.530	C>A 和 B	双协同作用
X9 $\cap$ X12=0.475	0.649	C>A 和 B	双协同作用
X9 $\cap$ X11=0.471	0.580	C>A 和 B	双协同作用
X12 $\cap$ X15=0.459	0.434	C>A+B	非线性协同作用
X8 $\cap$ X12=0.447	0.422	C>A+B	非线性协同作用
X10 $\cap$ X12=0.444	0.447	C>A 和 B	双协同作用
X12 $\cap$ X14=0.430	0.415	C>A+B	非线性协同作用
X7 $\cap$ X9=0.429	0.443	C>A 和 B	双协同作用
X3 $\cap$ X12=0.428	0.425	C>A+B	非线性协同作用
X6 $\cap$ X12=0.427	0.439	C>A 和 B	双协同作用
X12 $\cap$ X16=0.423	0.416	C>A+B	非线性协同作用

#### 4 结论

本研究首先构建了县域耕地产能评价体系。该体系强调了土壤要素和人为要素对耕地产能的影响。以光温 (气候) 生产潜力指数反映气候条件, 并作为耕地产能评价的基础, 利用耕地质量中的地力水平系数和技术水平系数对其进行修正, 引入地理探测器模型, 对河北省黄骅市耕地产能进行评价, 探讨其空间格局特征及影响因素。研究结论如下:

(1) 黄骅市耕地产能呈现明显的区域特征, 耕地产能指数较高的区域与水浇地在黄骅市的分布基本吻合, 并呈现零星分布的特点, 从空间分布看, 主要位于北部的齐家务乡、官庄乡、南大港产业园区; 耕地产能指数等较低的区域与旱地在黄骅市的分布

基本一致, 主要集中在齐家务乡北部。

(2) 因子探测器探测结果表明盐渍化程度和的灌溉保证率两个因子是决定黄骅市耕地产能空间分布格局的最主要因子, 土壤养分元素和土体构型在影响耕地产能的空间格局方面也具有相对重要的地位, 其他因子由于在黄骅市的差异较小, 导致对耕地产能的空间格局影响相对较小。

(3) 交互探测器探测结果表明因子之间具有交互作用, 主要表现为协同作用和非线性协同作用。其中盐渍化程度和灌溉保证率之间交互最强, 其次是土体构型和灌溉保证率、耕层质地和灌溉保证率、土体构型和盐渍化程度以及排水条件和盐渍化程度, 交互作用的影响度  $q$  值均达到 50% 以上。

## 参考文献:

- [1] 朱德举. 中国耕地保护 [M]. 北京: 中国大地出版社, 1997.
- [2] 聂英. 中国粮食安全的耕地贡献分析 [J]. 经济学家, 2015, (1):83-93.
- [3] 吴克宁, 赵瑞, 赵华甫. 对当前我国耕地质量调查评价的思考 [J]. 中国土地, 2018(3): 19-20.
- [4] 殷秀萍. 我国农业综合生产能力动态评价与相关问题研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
- [5] 张凤荣, 张晋科, 张迪, 等. 1996—2004 年中国耕地的粮食生产能力变化研究 [J]. 中国土地科学, 2006, 20(2): 8-14.
- [6] 郟文聚, 王洪波, 王国强, 等. 基于农用地分等与农业统计的产能核算研究 [J]. 中国土地科学, 2007(4): 32-37.
- [7] 伍育鹏, 郟文聚, 邹如. 基于耕地质量评价的耕地产能核算方法及分布 [J]. 农业工程学报, 2008(S1): 85-89.
- [8] 陈丽, 郝晋珉, 艾东, 等. 基于改进农业生态区划法的耕地综合量能指数模型构建 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 268-276.
- [9] 宋戈, 邹朝晖, 王越. 东北粮食主产区县域耕地产能核算及其影响因子分析 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 308-317.
- [10] 史舟, 梁宗正, 杨媛媛, 等. 农业遥感研究现状与展望 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 247-260.
- [11] 陈东湘, 周生路, 吴绍华. 基于遥感评价城市扩张对耕地质量等级结构及产能的影响 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 264-269.
- [12] 欧阳真. 沉江市耕地质量和耕地产能评价研究 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2018.
- [13] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with GeogDetector [J]. Environmental Modelling & Software, 2005, 20(10):114-115.
- [14] Cao F, Ge Y, Wang J F. Optimal discretization for geographical detectors-based risk assessment [J]. Mapping Sciences & Remote Sensing, 2013,50(1):78-92.
- [15] 张杰. 成都平原地区土地利用变化及驱动力分析 [D]. 成都: 四川师范大学, 2018.
- [16] 庞静. 基于地理探测器模型的自然和人为因素对植被变化的影响 [D]. 太原: 山西大学, 2016.

(编辑: 梁虹)

(上接第 9 页)

- [15] 春亮, 陈范骏, 张福锁, 等. 不同氮效率玉米杂交种的根系生长、氮素吸收与产量形成 [J]. 植物营养与肥料学报, 2005,11(5): 615-619.
- [16] 王敬锋, 刘鹏, 赵秉强, 等. 不同基因型玉米根系特性与氮素吸收利用的差异 [J]. 中国农业科学, 2011,44(4): 699-707.
- [17] Qi W Z, Liu H H, Liu P, et al. Morphological and physiological characteristics of corn roots from cultivars with different yield potentials [J]. European Journal of Agronomy, 2012, 38(2): 54-63.
- [18] 马存金, 刘鹏, 赵秉强, 等. 施氮量对不同氮效率玉米品种根系时空分布及氮素吸收的调控 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014,20(4):845-859.
- [19] 刘胜群, 宋凤斌, 王燕. 玉米根系性状与地上部性状的相关性研究 [J]. 吉林农业大学学报, 2007,29(1):1-6.
- [20] 王艳, 米国华, 陈范骏, 等. 玉米自交系氮效率基因型差异的比较研究 [J]. 应用与环境生物学报, 2001(4):361-365.
- [21] Chen Y, Wang H Z, Liu P, 等. 品种和氮素供应对玉米根系特征及氮素吸收利用的影响 [J]. 中国农业科学, 2017,50(12):2259-2269
- [22] Tombesi S, Johnson R S, Day K R, et al. Relationships between xylem vessel characteristics, calculated axial hydraulic conductance and size-controlling capacity of peach rootstocks [J]. Annals of Botany, 2009,105(2): 327-331.
- [23] Lynch J. Roots of the second green revolution [J]. Australian Journal of Botany, 2010,55(5):493-512.
- [24] Saengwilai P, Nord E A, Chimungu J G, et al. Root cortical aerenchyma enhances nitrogen acquisition from low-nitrogen soils in maize [J]. Plant physiology, 2014, 166(2):726-735.
- [25] Postma J A, Lynch J P. Root cortical aerenchyma enhances the growth of maize on soils with suboptimal availability of nitrogen, phosphorus, and potassium [J]. Plant Physiology, 2011,156(3):1190-1201.
- [26] 刘梅, 吴广俊, 路笃旭, 等. 不同年代玉米品种氮素利用效率与其根系特征的关系 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017,23(1):71-82.
- [27] Patompong S, Eric A N, Joseph G, et al. Root cortical aerenchyma enhances nitrogen acquisition from low-nitrogen soils in maize [J]. Plant Physiology, 2014, 166: 726-735,

(编辑: 梁虹)