

基于综合评价模型的区域耕地质量评价与空间集聚研究

——以江苏省东海县为例

陈逸飞¹, 施晓辉², 朱春成², 王晓瑞³

(1. 扬州大学, 江苏扬州 225000; 2. 博源规划设计集团有限公司, 江苏南京 210004; 3. 江苏省土地开发整理中心, 江苏南京 210017)

摘要 从耕地质量的综合性、生产性、生态性出发, 界定了耕地质量包括自然质量、生产质量、绿色质量 3 个层次的内涵, 建立了耕地质量评价的综合模型。通过土壤样品采集与外业调查获取相关数据, 应用综合评价模型评价区域耕地质量, 并研究耕地质量的数量及空间分布规律。结果显示, 研究区自然质量、生产质量、绿色质量、综合质量分别平均为 2.6 级、2.4 级、2.3 级、3.3 级, 较好地反映了区域自然条件水平、生产能力水平、作物质量水平; 评价结果空间集聚特征明显, 绿色质量高等级地主要集聚于西部地区, 自然质量、生产质量、综合质量高等级耕地主要集聚于东南部地区, 各层次的耕地质量可为区域耕地保护、粮食安全保障及农业可持续发展提供科学依据。

关键词 耕地质量; 空间集聚; 综合评价模型; 江苏省东海县

中图分类号 F301.2 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)15-0078-07

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2020.15.023



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Evaluation of Farmland Quality and Spatial Variation Based on Comprehensive Evaluation Model—Taking Donghai County, Jiangsu Province as an Example

CHEN Yi-fei¹, SHI Xiao-hui², ZHU Chun-cheng² et al (1. Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225000; 2. Boyuan Planning and Design Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210004)

Abstract Based on the comprehensiveness, productivity and ecology of farmland quality, the connotation of farmland quality including natural quality, production quality and green quality was defined, and a comprehensive evaluation model of farmland quality evaluation was established. Relevant data were obtained through soil sample collection and field surveys, a comprehensive evaluation model was used to evaluate regional farmland quality, and the quantity and spatial distribution of farmland quality were studied. The results showed that the natural quality, production quality, green quality and comprehensive quality of the study area averaged 2.6, 2.4, 2.3, and 3.3, respectively, which reflected the average grades of regional natural conditions, productivity and crop quality. The spatial aggregation characteristics of the evaluation results were obvious. The high-quality green quality land was mainly concentrated in the western region, and the high-quality farmland of natural quality, production quality and comprehensive quality was mainly concentrated in the southeast region. Different levels of farmland quality can provide a scientific basis of regional farmland protection, food safety and sustainable agricultural development.

Key words Farmland quality; Spatial cluster; Comprehensive evaluation model; Donghai County of Jiangsu Province

耕地是农业生产最基本的资源, 是人们获取粮食及其他农产品不可替代的生产资料, 安全、肥沃、协调的耕地是农业可持续发展的前提。随着我国社会经济的快速发展, 人地矛盾日益突出, 耕地数量、质量、生态问题日益严峻, 给生态环境、食品安全及农业可持续带来了巨大的压力, 切实保护耕地对提高耕地综合生产能力、保障粮食安全有重大意义, 而耕地质量评价是耕地保护的基础^[1-3]。

我国自 20 世纪 50 年代开始荒地资源的评价, 以合理利用土地为目的的土地评价研究逐渐蓬勃发展起来, 80 年代国家土地管理局成立伊始开始了农用地分等定级工作^[4-6]。近年来, 随着土地管理、农业集约化水平的发展, 耕地质量的研究成为土地评价的重点内容之一, 国内外学者对耕地质量的内涵界定、评价方法、成果应用等多方面进行了深入的研究。如 Eswaran 等^[7] 分析指出土地质量的管理和监测将是未来的挑战, 保持并提高土地质量是保证区域可持续发展的重要基础; 陈朝等^[8] 研究认为耕地质量应包括本底质量、经济质量和生态质量; 聂艳等^[9] 利用 ArcGIS 和模糊物元贴适度聚类分析模型评价耕地质量; 张广星等^[10]、于东升等^[11] 研究了 BIOM-NORM、NORM、EO 耕地质量评价方法的科学性; Shao

等^[12] 以农用地市场化为目的对耕地进行了分等定级研究。

耕地质量影响因素众多, 现有研究还没有从气候、区位、土壤、管理、生态等多方面、全方位、系统性地研究耕地质量, 耕地质量的生产性、层次性、综合性研究不足。该研究以区域光温生产潜力为基础, 通过评价耕地的自然条件水平、利用管理水平及生态环境水平, 得到不同层次、反映不同内容的耕地质量状况, 最终综合评价区域耕地质量, 评价结果综合反映耕地利用水平、环境状况及生产能力, 可为区域耕地保护、粮食安全保障及农业可持续发展提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 综合评价模型的内涵 耕地质量是耕地资源内在属性与人类社会干预结果的综合表现, 是以人类对粮食安全、社会安全、生态安全等方面的需求为目的而产生的, 脱离人类特定需求的耕地质量是没有实际意义的。因此, 耕地质量应该包括耕地本身所固有的气候、土壤、地形等自然条件的资源禀赋水平, 以及人类利用管理、生态环境对耕地的影响程度。

从粮食的数量及质量安全考虑, 耕地生产能力应该是耕地质量的基本衡量标准, 而生产能力又包括数量及质量两方面的内容。光温生产潜力是在农业生产条件得到充分保证, 其他环境因素处于最适宜状态, 作物在当地光、温资源条件下, 所能达到的最高产量, 是区域作物生产能力的上限; 不同

作者简介 陈逸飞(1999—), 男, 江苏盐城人, 从事水利工程研究。

收稿日期 2019-12-26

区位的耕地因光照、温度、降水等因素的影响,光温生产潜力及耕作制度的差异使得耕地固有生产能力具有显著的差异;而在相同光温条件下,不同的土壤、地形地貌条件又进一步限制了耕地的生产能力;最后,人类对耕地的利用管理方式、水平及对环境的污染,明显影响耕地生产能力的发挥程度。因此耕地质量以光温生产潜力为基础,应包括 3 个方面的内容:自然质量、生产质量、绿色质量。自然质量指耕地土壤、地形等强限制性因素决定的耕地资源禀赋水平;生产质量突出强调氮、磷、钾等人工肥力因素以及人工灌溉、排水对农业种植的现势性影响;而绿色质量突出反映人类活动造成的环境污染对农作物品质的影响程度。

综合评价模型考虑了耕地质量的综合性、生产性及生态性,充分体现了耕地系统是一个自然-社会复合生态系统,从不同角度反映耕地质量的内容,建立全面、立体的耕地质量体系,对土地管理、农业生产、环境治理等方面具有指导意义。

1.2 研究区概况 东海县位于江苏省东北部,地处 $34^{\circ}11' \sim 34^{\circ}44'N$ 、 $118^{\circ}23' \sim 119^{\circ}10'E$,属黄淮海平原东南边缘的平原

岗岭地区,地势西高东低,中西部平原丘陵、起伏连绵,东部地势平坦、湖荡连片。县域耕地资源丰富,农业生产历史悠久,集约化程度高;土壤肥沃、气候适宜、水资源丰富,适合水稻、小麦、玉米等作物的种植。作为全国典型的基本农田示范区,2011 年东海县被国土资源部选为全国第一批 15 个耕地质量等级监测试点县之一,同时被确定为国家首批耕地质量野外监测先导基地。

1.3 土壤样点采集与分析 于 2009 年在东海县域范围内,以 4 km^2 为一个采样单元,在每个采样单元中心点附近的耕地内采集大于 1 kg 的土壤样品,采样深度为 $0 \sim 20 \text{ cm}$,共采集样品 380 件(图 1)。样品自然风干后分别过 1.65 、 0.30 和 0.15 mm 筛,按指定方法进行样品的测试分析。

土壤有机质采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-H}_2\text{SO}_4$ 氧化、 FeSO_4 标准溶液滴定的方法测定;全氮采用半微量开氏法测定;速效磷采用钼锑抗比色法测定;速效钾采用火焰光度法测定。重金属元素 Hg 和 As 采用还原气态-原子荧光光谱法测定;Cd 采用石墨炉原子吸收法测定;Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 采用电感耦合高频等离子体发射光谱法(ICP)测定。

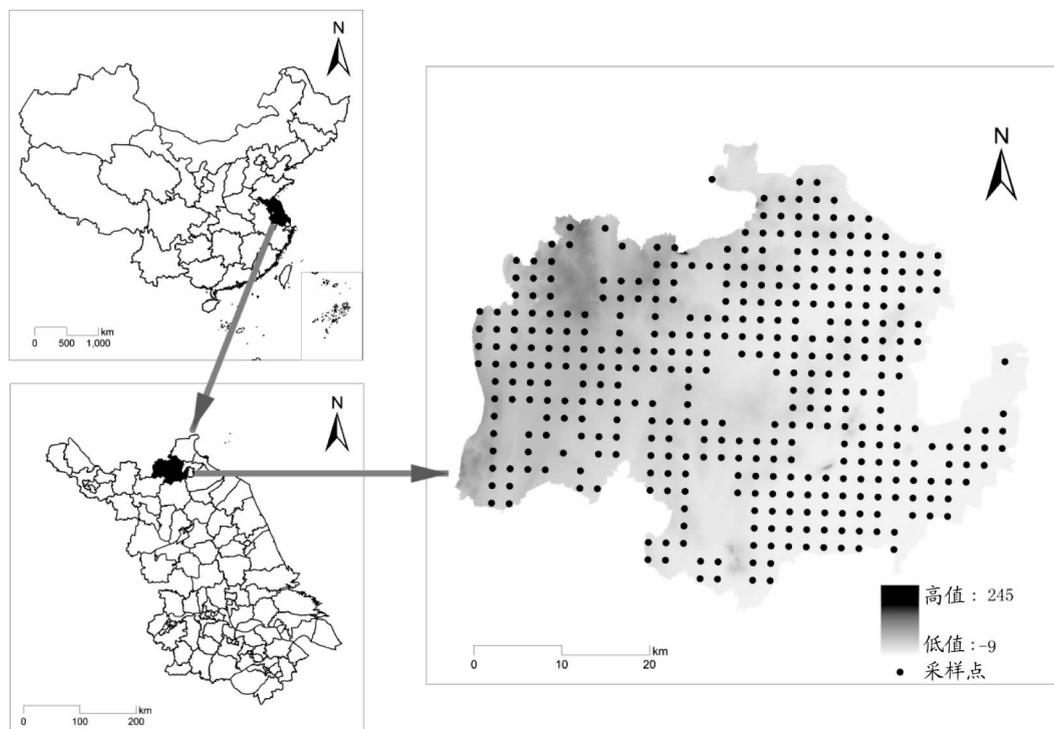


图 1 研究区位置及样点分布

Fig. 1 Location of the study area and distribution of sample points

1.4 指标体系及数据来源 耕地自然质量主要反映既定的区位、气候条件下,土壤、地形等因素决定的农业种植条件,因此根据研究区地形、地貌、土壤等自然条件特征,选择土壤有机质、pH、表层土壤质地、表层土壤含盐量、土壤障碍层出现深度、耕作层厚度 6 个关键因素,构建自然质量评价的指标体系。

耕地生产质量主要反映人类农业种植活动对耕地的改造、利用程度,灌排条件与肥力水平的改善是人类干预农业

生产的主要手段与方式,因此选择影响农业生产水平的主要人为因素构建生产质量的评价指标体系,分别是耕地灌溉保证率、耕地排水条件、土壤全氮、速效磷、速效钾。

耕地绿色质量主要反映耕地受污染的程度,直接影响着农业生态环境、农作物生长发育与农产品品质。土壤重金属污染是研究区土壤污染的主要类型,重金属污染物在土壤中积累转化,可通过食物链进入人体,严重危害人类的身体健康,因此选择对耕地环境有重要影响的重金属污染程度来表

征区域耕地环境质量。根据《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)确定的影响土壤环境的因子,选择 Cd、Hg、As、Cu、Pb、Cr、Zn、Ni 8 种重金属元素作为评价因子^[13]。

各指标数据来源有 3 个途径,土壤有机质、pH、含盐量、全氮、速效磷、速效钾及重金属元素通过该研究采集的土壤样品测试得到;土壤质地、障碍层距出现深度及耕作层厚度一般不易发生变化,因此根据《土壤志》中土种的相关数据作为该类指标的数据来源;土壤侵蚀程度、耕地灌溉保证率、排水条件从农业部门的地力监测数据中获取(表 1)。

表 1 综合评价模型指标体系

Table 1 Index system of comprehensive evaluation model

耕地质量 Cultivated land quality	评价指标 Evaluation index	数据来源 Data sources
自然质量 Natural quality	土壤有机质	土壤样品测试
	土壤 pH	土壤样品测试
	表层土壤质地	《土壤志》
	表层土壤含盐量	土壤样品测试
	土壤障碍层出现深度	《土壤志》
	耕作层厚度	《土壤志》
	土壤侵蚀程度	外业调查
生产质量 Production quality	全氮	土壤样品测试
	速效磷	土壤样品测试
	速效钾	土壤样品测试
	耕地灌溉保证率	外业调查
	耕地排水条件	外业调查
绿色质量 Green quality	Cd、Hg、As、Cu、Pb、Cr、 Zn、Ni	土壤样品测试

1.5 研究方法 该研究以光温生产潜力为基础,通过评价耕地的自然质量、生产质量、绿色质量,综合修正作物光温生

产潜力,得到耕地在不同作物条件下的质量水平,再根据区域农业种植的耕作制度,得到区域耕地综合质量。

1.5.1 自然质量、生产质量评价。

1.5.1.1 单因素评价。运用模糊数学的隶属函数原理,根据作物生长效应曲线确定各个指标的隶属函数,求得各项指标的隶属度值。按作物效应曲线各指标隶属函数分 3 种类型:S 型、抛物线型、Z 型,有机质、土壤障碍层出现深度、耕作层厚度、全氮、速效磷、速效钾、耕地灌溉保证率 7 个指标属于 S 型隶属函数,是指在一定范围内作物产量与指标的增长呈正相关,而低于或超过这个范围,指标的增长对作物生长影响很小或者没有影响^[14]。隶属度函数如公式(1):

$$F(x) = \begin{cases} 0.1 & x \leq a_1 \\ 0.9 \times (x - a_1) / (a_2 - a_1) + 0.1 & a_1 < x \leq a_2 \\ 1.0 & x > a_2 \end{cases} \quad (1)$$

土壤 pH 属抛物线型隶属度函数,其隶属度函数如公式(2):

$$F(x) = \begin{cases} 0.9 \times (x - a_1) / (a_2 - a_1) + 0.1 & a_1 < x \leq a_2 \\ 1.0 & a_2 < x \leq a_3 \\ 0.9 \times (a_4 - x) / (a_4 - a_3) + 0.1 & a_3 < x \leq a_4 \\ 0.1 & x \leq a_1 \text{ 或 } x > a_4 \end{cases} \quad (2)$$

表层土壤含盐量属 Z 型隶属度函数,其隶属度函数如公式(3):

$$F(x) = \begin{cases} 1.0 & x \leq a_1 \\ 0.9 \times (a_2 - x) / (a_2 - a_1) + 0.1 & a_1 < x \leq a_2 \\ 0.1 & x > a_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中, a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 为隶属度函数临界值,根据已有研究确定各指标临界值如表 2 所示。

表 2 指标隶属函数临界值

Table 2 Critical value of index membership function

临界值 Critical value	有机质 Organic matter %	障碍层出现深度 Obstacle layer depth cm	耕作层厚度 Tillage layer thick- ness//cm	土壤 pH Soil pH	土壤含盐量 Soil salinity cmol/kg	全氮 TN g/kg	有效磷 Available phosphorus mg/kg	速效钾 Quick-acting potassium mg/kg	灌溉保证率 Irrigation guarantee rate//%
a_1	1.0	30	10	4.0	0.05	0.75	15	50	60
a_2	2.0	60	24	6.0	0.40	1.20	25	100	90
a_3				8.0					
a_4				8.5					

表层土壤质地、土壤侵蚀程度、耕地排水条件 3 个指标为定性描述的非数值型指标,根据这 3 个指标对农业生产的影响程度与方式,参考该区域的相关研究结果对指标赋值,赋值标准如表 3。

1.5.1.2 指标权重确定。各评价指标权重采用主成分分析的方法计算,通过计算各个公因子方差占公因子方差总和的百分数,将公因子方差转换为 0~1 的数值,作为单项评价指标的权重值。在此基础上,进行专家咨询,最终得到各评价指标的权重值(表 4)。

1.5.1.3 评价模型。自然质量、生产质量评价采用加权求和模型,计算公式如下:

表 3 土壤质地、土壤侵蚀、排水条件隶属函数及描述

Table 3 Membership functions and description of soil texture, soil erosion, drainage conditions

隶属度值 Membership value	表层土壤质地 Surface soil texture	土壤侵蚀程度 Soil erosion	耕地排水条件 Arable land drainage conditions
1.0	中壤、轻壤	无侵蚀	优
0.8	重壤、砂壤	轻度侵蚀	良
0.6	黏土、砂土	中度侵蚀	一般
0.4	—	重度侵蚀	差

表 4 评价指标权重

Table 4 Evaluation index weights

耕地质量 Cultivated land quality	评价指标 Evaluation index	权重 Weights
自然质量 Natural quality	土壤有机质	0.25
	土壤 pH	0.05
	表层土壤质地	0.20
	表层土壤含盐量	0.10
	土壤障碍层出现深度	0.12
	耕作层厚度	0.18
	土壤侵蚀程度	0.10
生产质量 Production quality	全氮	0.16
	速效磷	0.12
	速效钾	0.10
	耕地灌溉保证率	0.42
	耕地排水条件	0.20

$$NQ = \sum_{i=1}^n W_i N_i \quad (4)$$

$$OQ = \sum_{i=1}^n W_i O_i \quad (5)$$

式中, NQ 为评价单元的自然质量指数; OQ 为评价单元的生产质量指数; W_i 为 i 指标权重; N_i 为自然质量 i 指标的隶属度值; O_i 为生产质量 i 指标的隶属度值。

1.5.2 绿色质量评价。 重金属污染程度评价运用综合污染指数法。综合污染指数法由土壤重金属评价标准与元素背景值共同确定各污染元素对土壤环境的影响程度, 由此计算评价区域内多种重金属的综合污染水平, 能直观地反映各个重金属对污染的贡献率^[15]。土壤重金属评价标准采用《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995) 中确定的 II 类土壤环境质量的二级标准, 即为保障农业生产, 维护人体健康的土壤限制值, 因此该方法较适合对农业土壤环境质量的的评价。评价模型如下:

(1) 单因子评价。计算式为:

$$P_i = C_i / S_i \quad (6)$$

式中, P_i 为 i 污染因子的单因子污染指数; C_i 为 i 污染因子的实测值; S_i 为 i 污染因子背景值。

(2) 权重值计算。权重值根据污染因子的环境可容纳量来确定, 计算式为:

$$W_i = (1/K_i) / \sum 1/K_i \quad (7)$$

$$K_i = (B_i - S_i) / S_i \quad (8)$$

式中, K_i 为 i 污染因子的环境可容纳量, B_i 为污染因子环境评价标准, S_i 为 i 因子背景值。

(3) 评价模型。绿色质量评价采用加权评价模式, 其计算式为:

$$GQ = \sum_{i=1}^n W_i P_i \quad (9)$$

式中, GQ 为评价单元的绿色质量指数; W_i 为 i 污染因子的权重值; P_i 为 i 污染因子的单因子污染指数。

土壤重金属元素背景值取江苏省土壤元素背景值^[16], 评价标准采用《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995) 中确定的 II 类土壤环境质量的二级标准(表 5)。

表 5 元素背景值及评价标准

Table 5 Element background values and evaluation criteria

元素 Element	背景值 Background value(S_i)	评价标准 Evaluation criteria(B_i)
Hg	0.025	0.5
Cd	0.085	0.6
Cu	23.4	100
Pb	22	300
Zn	64.8	250
Ni	32.8	250
Cr	75.6	300
As	9.4	25

1.5.3 综合质量评价。

1.5.3.1 综合质量分值。 自然质量、生产质量与绿色质量是从 3 个不同的角度对耕地质量进行衡量, 其内涵与所反映的内容完全不同, 评价体系及评价方法也不同, 对耕地质量的表现没有交叉重叠, 呈垂直关系, 参考矢量求和模式, 耕地综合质量分值采用矢量模型计算得到。

矢量求和模型:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 \quad (10)$$

$$|F| = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2} \quad (11)$$

由矢量求和模型推出综合质量分值计算模型:

$$ZH_i = \sqrt{\frac{NQ_i^2 + OQ_i^2 + GQ_i^2}{3}} \quad (12)$$

式中, ZH_i 为 i 单元综合质量分值, NQ_i 为 i 单元自然质量指数, OQ_i 为 i 单元生产质量指数, GQ_i 为 i 单元绿色质量指数。

1.5.3.2 综合质量指数与分级。 根据研究区标准耕作制度确定该区域标准作物为小麦、水稻, 熟制为一年两熟。查询标准作物光温生产潜力, 并按照作物产量比系数折算为标准粮光温生产潜力, 求和即得区域总光温生产潜力, 然后以综合质量分值修正总光温生产潜力得到综合耕地质量指数, 并按指数分布情况进行分级。

$$C_i = (\alpha_1 \times \beta_1 + \alpha_2 \times \beta_2) \times ZH_i \quad (13)$$

式中, C_i 为 i 单元综合耕地质量指数, α_1 、 α_2 分别为小麦、水稻光温生产潜力, β_1 、 β_2 分别为水稻、小麦产量比系数, ZH_i 为 i 单元综合质量分值。小麦、水稻光温生产潜力、产量比系数采用全国《耕地质量分等规程》确定的相关参数(表 6)。不同层次耕地质量分级标准如表 7 所示。

表 6 小麦、水稻光温潜力及产量比系数

Table 6 Light and temperature potential and yield ratio coefficient of wheat and rice

作物 Crop	光温生产潜力 Light and temperature production potential//kg/hm ²	产量比系数 Output ratio coefficient
冬小麦 Winter wheat	16 785	0.8
一季稻 Single-season rice	29 925	1.0

表7 不同层次耕地质量分级标准

Table 7 Farmland quality classification standards at different levels

等级 Rank	自然质量 Natural quality	生产质量 Production quality	绿色质量 Green quality	综合质量 Overall quality
1	0.9~1.0	0.85~1.00	<0.5	≥2 500
2	0.8~<0.9	0.70~<0.85	0.5~<1.0	2 000~<2 500
3	0.7~<0.8	0.55~<0.70	1.0~<1.5	1 500~<2 000
4	0.6~<0.7	0.40~<0.55	≥1.5	1 000~<1 500
5	<0.6	<0.40	—	<1 000

1.5.4 空间自相关分析。空间自相关分析是探索性空间数据分析(exploratory spatial data analysis, ESDA)研究中的重要方法之一,反映一个区域单元上某种地理现象或某一属性与邻近区域单元上同一现象或属性相关程度,是空间域内聚集程度的一种量度,包括全局空间自相关和局部空间自相关两类。全局空间自相关是对某种地理现象或某属性在整个区域的空间特征的描述,进而利用 Moran's I 指数判断此现象或属性值在空间上是否存在聚集特性。而局部空间自相关能够测度一个局部小区域单元上的某种地理现象或某一属性值的空间异质性,能够推算出聚集地的空间位置和范围,用局域指标能够揭示各个区域单元空间自相关的程度。全局空间自相关计算公式:

$$I = n \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij}} \quad (14)$$

局部空间自相关计算公式:

$$I_i = n (x_i - \bar{x}) \frac{\sum_{j=1}^m w_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})} \quad (15)$$

式中, n 为研究对象的数目; x_i 为第*i*对象(村)观测值; x_j 为第*j*对象观测值; \bar{x} 为 x_i 的平均值; w_{ij} 为研究对象*i*与*j*之间的空间连接矩阵,表示空间单元间潜在相互作用程度。空间连接矩阵一般表示为*N*维的矩阵 $W(n \times n)$,通过空间相邻和空间距离来确定。

2 结果与分析

2.1 耕地质量综合评价结果 根据上述方法,对研究区耕地自然质量、生产质量、绿色质量及综合质量进行评价,评价结果如表8、图2。评价结果显示,东海县耕地自然质量、生产质量、绿色质量以中、高等级(1~4等级)耕地为主,综合质量以中等等级耕地为主,表明东海县耕地自然条件及资源禀赋较好,在此基础上人类活动对耕地的改善利用程度较高,耕地生态环境亦处于清洁健康水平,耕地质量整体较高。以面积加权平均得到不同层次耕地质量的平均级别,其中,自然质量平均级别为2.6级,生产质量平均级别为2.4级,绿色质量平均级别为2.3级,综合质量平均为3.3级。

表8 东海县耕地质量综合评价结果

Table 8 Comprehensive evaluation results of farmland quality in Donghai County

等级 Rank	自然质量 Natural quality		生产质量 Production quality		绿色质量 Green quality		综合质量 Overall quality	
	面积 Area hm ²	比例 Proportion %						
1	28 715.50	23.45	37 751.19	30.82	591.99	0.48	7 113.67	5.81
2	35 240.45	28.77	25 121.64	20.51	83 228.79	67.95	27 796.92	22.69
3	29 902.59	24.41	37 427.98	30.56	36 425.60	29.74	33 950.16	27.72
4	19 115.90	15.61	16 266.73	13.28	2 235.91	1.83	26 655.65	21.76
5	9 507.85	7.76	5 914.75	4.83	—	—	26 965.89	22.02

从空间分布来看,自然质量、生产质量中东部地区高于西部地区,绝大部分中、低等级(2~5等级)耕地分布于西部,东部地区主要为高等级(1等级)耕地,该空间分布特征与东海县地形、地貌、土壤等农业种植条件相一致。而绿色质量空间分布与此正好相反,高等级耕地主要分布于中西部地区,低等级(5等级)耕地主要分布于东南部,中西部地区耕地质量健康无污染,东南部地区部分耕地受到一定程度的污染影响,其可能原因是由于连云港市区在东海县东南方向,受到连云港市区工业、交通的污染影响,致使其东南部地区耕地质量存在一定的污染。综合质量中东部地区整体优于西部地区,东海县中东部地区是地势平坦的优质农业区,土壤肥力状况较好,同时该区域以及周边地区较少分布污染企业,土壤环境状况优良,因此中东部地区耕地综合质量较好;西部地区是岗丘地区,地势起伏不平,土质以砂土为主,农业种植产量较低,虽然该地区土壤环境质量状况较好,但自然条件、利用水平较差,导致综合耕地质量较低。

2.2 耕地质量空间集聚性判定 由 Moran's I 指数判定研究区耕地质量空间集聚程度,东海县耕地自然质量、生产质量、绿色质量及综合质量的 Moran's I 指数分别为 0.551 4、0.747 6、0.952 7、0.835 0,显著性检测 $P \leq 0.05$ 。集聚性判定结果显示各层次耕地质量的空间集聚性都较好,其中绿色质量的空间集聚程度最为显著,而自然质量的空间集聚格局较为分散,这是因为东海县自然条件复杂,自然质量在空间上的分异明显,而该地区工业活动尚不发达,耕地环境水平较好,绿色质量整体较好,空间集聚明显。

Moran 散点图4个象限反映观测单元的空间相关性,可定量分析高值聚集区的观测单元和低值聚集区的观测单元。H-H(High-High 空间关联区)和 L-L(Low-Low 空间关联区)象限的空间单元观测值存在较强的空间正相关,单元具有均质性;H-L(High-Low 空间关联区)和 L-H(Low-High 空间关联区)象限的空间单元观测值存在较强的空间负相关,单元具有异质性。由图3可知,耕地自然质量、生产质

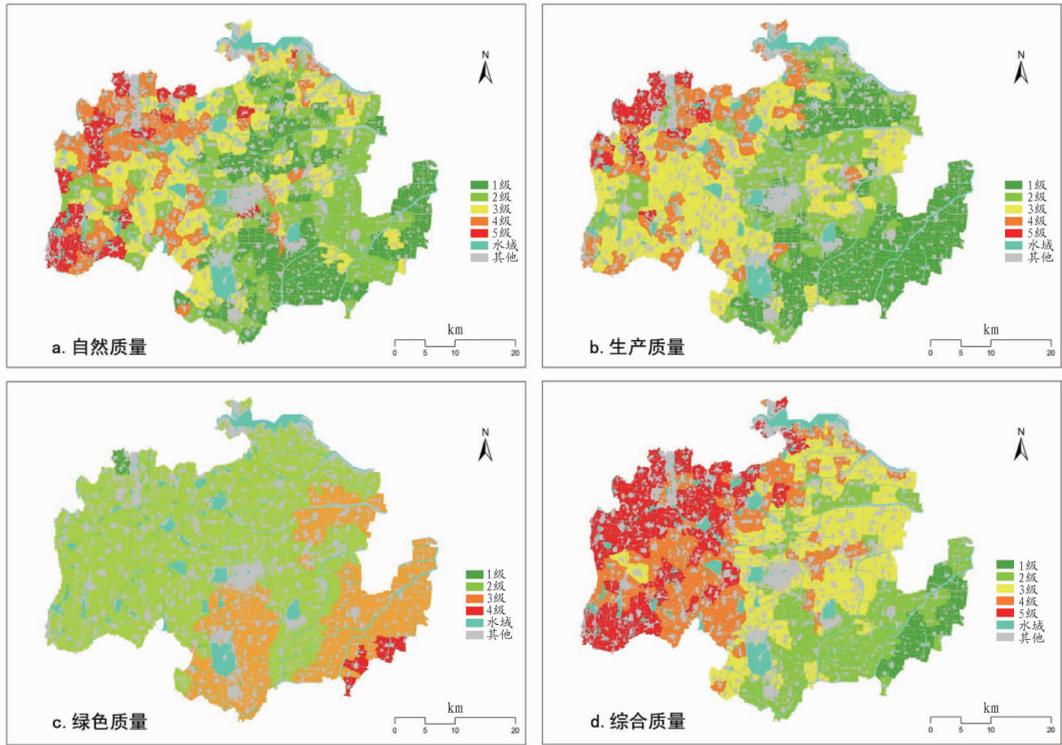


图 2 东海县耕地质量综合评价结果

Fig. 2 Comprehensive evaluation results of farmland quality in Donghai County

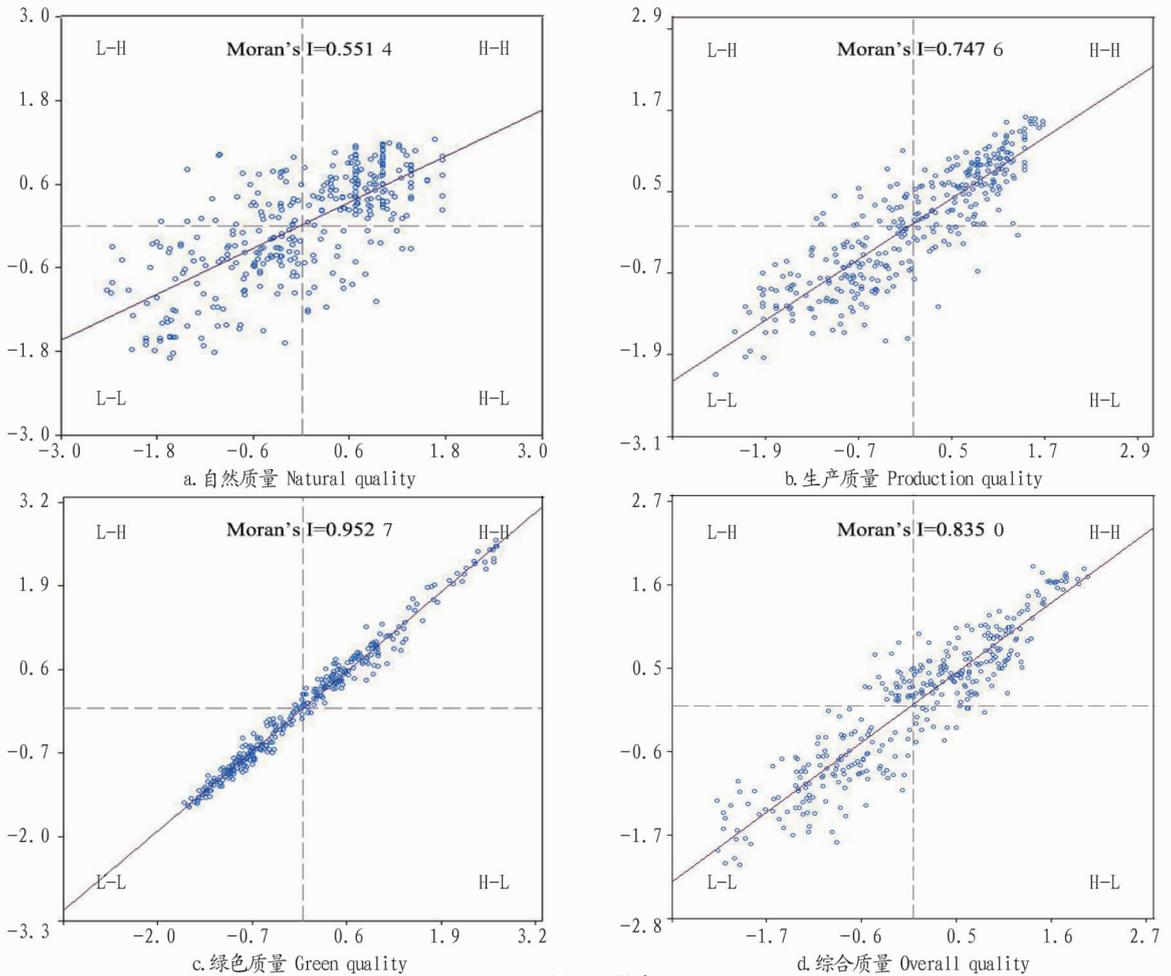


图 3 Moran 散点图

Fig. 3 Moran scatter plot

量、绿色质量、综合质量位于 H-H 高值聚集区的单元分别占样本总数的 18.73%、27.09%、30.84%、21.90%，这是东海县高质量耕地的数量分布情况；位于 L-L 低值聚集区的单元分别占样本总数的 12.97%、21.90%、21.04%、25.36%，这是东海县低质量耕地的数量分布情况。

2.3 耕地质量空间集聚格局 根据 Moran 散点图，在 5% 显著性水平下绘制 LISA 集聚图，分析东海县耕地质量的空间集聚格局(图 4)。从图 4 可以看出，自然质量高等级耕地主要集聚于东南部地区及中部个别区域，高等级集聚区平均级别为 1.4 级；低等级耕地主要集聚于西部地区，低等级集聚区平均级别为 4.1 级，该空间集聚特征反映了东海县农业种植的自然条件水平。生产质量高等级耕地主要集聚于东南部及北部地区，高等级集聚区平均级别为 1.1 级；低等级耕地主要集聚于西部地区，低等级集聚区平均级别为 3.5 级；

该空间集聚特征反映了东海县农业种植的生产能力状况。绿色质量空间集聚格局与自然质量、生产质量相反，高等级耕地地聚集区主要分布于西部地区，平均级别为 2.0 级；低等级耕地聚集区主要分布于东南部地区，平均级别为 3.1 级；该空间集聚特征反映了东海县农业作物产出的质量状况。综合质量高等级耕地主要集聚于东南部地区，平均级别为 1.9 级；低等级耕地地主要集聚于西部地区，平均级别为 4.6 级；该空间集聚特征表明东海县东南部地区农业种植的自然条件较好，生产能力较高，而作物产出质量相对安全的区域，是耕地保护与粮食生产的重点区域；西部地区虽然耕地环境水平较好，但自然条件差，粮食生产能力差，综合来看该区域农业生产基础较差，是未来耕地质量提升的重点区域，也是发展现代农业以改变传统农业现状的重点区域。

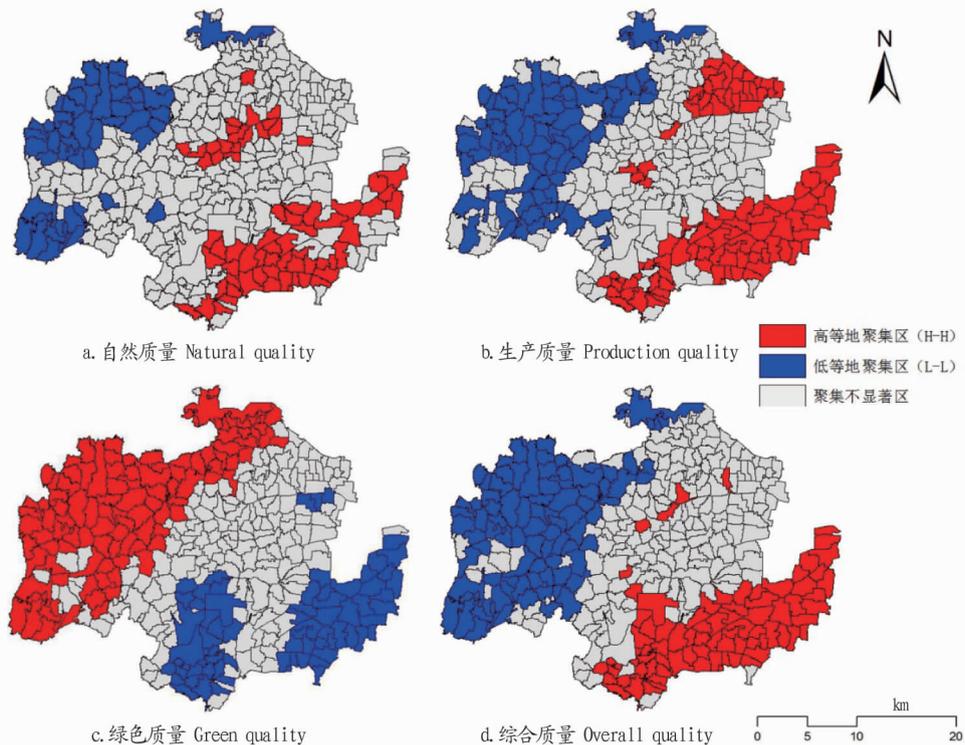


图 4 耕地质量 LISA 集聚图

Fig. 4 LISA agglomeration map of farmland quality

该研究结果从 3 个不同的角度综合评价了区域耕地质量，并分析了耕地质量的空间集聚特征，反映了耕地本身所固有的气候、土壤、地形等自然条件的资源禀赋水平，以及人类利用管理、生态环境对耕地的影响程度。自然质量可指导农业种植的区位选择，生产质量可反映农业生产的产出效益，而绿色质量可反映农产品的质量优劣程度，综合质量全面反映区域耕地的总体质量状况，因此，综合评价模型可为耕地质量的评价、管理及应用提供很好的科学手段。

3 结论

通过界定综合耕地质量的内涵，建立不同层次耕地质量的评价模型，评价区域耕地综合质量，分析了耕地质量的空间集聚格局，得出以下结论：

(1) 提出耕地质量的综合评价模型。耕地质量具有综合

性、生产性、层次性，以光温生产潜力为基础，包括自然质量、生产质量、绿色质量 3 个方面的内容，反映了耕地本身所固有的气候、土壤、地形等自然条件的资源禀赋水平，以及人类利用管理、生态环境对耕地的影响程度。

(2) 建立综合耕地质量评价模型。自然质量、生产质量与绿色质量是从 3 个不同的角度对耕地质量进行衡量，其内涵与所反映的内容完全不同，对耕地质量的表现没有交叉重叠，呈垂直关系，参考矢量求和模式，以自然质量、生产质量、绿色质量为基础建立综合耕地质量评价模型。

(3) 评价区域综合耕地质量。评价研究区综合耕地质量，结果显示东海县自然质量平均级别为 2.6 级，生产质量平均级别为 2.4 级，绿色质量平均级别为 2.3 级，综合质量

(下转第 88 页)

选择生长快速、需肥量大、对重金属有隔离固定等作用的植物品种。

该项目只针对滨海新区一条主要河道底泥进行了分析,样品量少,今后还需要增加市区多条河道底泥的取样分析,为高盐河道淤泥改良为绿化种植土提供更多数据和技术支撑。

参考文献

- [1] SINGH S P, TACK F M G, GABRIELS D, et al. Heavy metal transport from dredged sediment derived surface soils in a laboratory rainfall simulation experiment [J]. *Water, air and soil pollution*, 2000, 118(1/2): 73-86.
- [2] 朱广伟, 陈英旭, 王凤平, 等. 景观水体疏浚底泥的农业利用研究[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(3): 335-339.
- [3] 朱伟, 张春雷, 刘汉龙, 等. 疏浚泥处理再生资源技术的现状[J]. *环境科学与技术*, 2002, 25(4): 39-41.
- [4] 李睿. 《2012年中国海洋环境状况公报》发布近岸海域污染严重[J]. *珠江水运*, 2013(11): 28.
- [5] 刘彦诚. 天津市大沽排污河淤泥的综合处理处置方案研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [6] USEPA. Biosolids generation, use, and disposal in the United States [R]. Washington DC: Office of Solid Waste Response Emergency, 1999.
- [7] QI Y N, BEECHER N, STONE L. A national survey of biogas use at wastewater treatment plants in the United States: The results [J]. *European journal of marketing*, 2013(5): 655-666.
- [8] PAUL MOLONEY. Cultivating a market for sewage, (Toronto Star City Hall Bureau). *The Toronto Star* [R]. 2000.
- [9] 陈维华, 季树凯, 沈海涵, 天津滨海地区入海河道淤泥利用的对策研究[J]. *水利科技与经济*, 2007, 13(7): 461-463.
- [10] 杨丹, 范欣柯, 刘燕, 等. 河道疏浚底泥农业利用可行性分析[J]. *科技通报*, 2017, 33(1): 235-239.
- [11] 张明霞. 疏浚底泥在城市绿化中的应用[J]. *中国城市林业*, 2011, 9

(上接第84页)

平均级别为3.3级;空间分布上,中东部地区自然质量、生产质量、综合质量优于西部地区,绿色质量西部地区优于中东部地区。

(4)分析耕地质量空间集聚格局。绿色质量高等级耕地主要集聚于西部地区,低等级耕地主要集聚于东南部地区;自然质量、生产质量、综合质量高等级耕地主要集聚于东南部地区,低等级耕地主要集聚于西部地区。

参考文献

- [1] PIERI C, DUMANSKI J, HAMBLIN A, et al. Land quality indicators [R]. World Bank Discussion Papers, 1995: 315.
- [2] 周生路, 李如海, 王黎明. 江苏省农用地资源分等研究 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2004.
- [3] 姜广辉, 赵婷婷, 段增强, 等. 北京山区耕地质量变化及未来趋势模拟 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10): 304-311.
- [4] 路捷, 李玲, 吴克宁, 等. 基于农用地分等和土壤环境质量评价的耕地综合质量评价 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 323-329.
- [5] 郇文聚. 农用地分等及其应用研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [6] 高丽丽. 土地质量地球化学评估与农用地分等整合方法及成果应用研

(5): 50-51.

- [12] 邵立明, 何晶晶, 洪祖喜. 受污染疏浚底泥用作植物培植土的环境影响分析 [J]. *环境科学研究*, 2004, 17(3): 51-54, 74.
- [13] 黄明勇, 张民胜, 张兴, 等. 滨海盐碱地地区城市绿化技术途径研究——天津开发区盐滩绿化20年回顾 [J]. *中国园林*, 2009, 25(9): 7-10.
- [14] 张帮明, 岳俊杰. 天津滨海新区绿化客土资源的几点思考 [J]. *中国科技博览*, 2012(16): 314, 308.
- [15] 张金龙, 王振宇, 张清, 等. 天津滨海新区盐碱土绿化综合治理技术研究 [J]. *天津农业科学*, 2012, 18(6): 147-151.
- [16] 崔静. 天津市滨海新区土壤污染状况及防治措施初探 [C] // 中国环境科学学会. 2011中国环境科学学会学术年会论文集(第二卷). 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [17] 陈如海, 詹良通, 陈云敏, 等. 西溪湿地底泥氮、磷和有机质含量竖向分布规律 [J]. *中国环境科学*, 2010, 30(4): 493-498.
- [18] 姜翠玲, 章亦兵, 范晓秋. 沟渠湿地水体和底泥中有机质时空分布规律研究 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(6): 618-621.
- [19] 彭旭更, 胡保安. 面向污染水体的底泥环保疏浚技术与资源化利用 [J]. *水资源与水工程学报*, 2009, 20(6): 95-97, 102.
- [20] 徐旭, 孙振元, 潘远智, 等. 园林植物对重金属胁迫的响应研究现状 [J]. *世界林业研究*, 2007, 20(6): 36-41.
- [21] 王广林, 张金池, 庄家尧, 等. 31种园林植物对重金属的富集研究 [J]. *皖西学院学报*, 2011, 27(5): 83-87.
- [22] 洪祖喜, 何晶晶. 受污染底泥易地处理处置技术 [J]. *上海环境科学*, 2002, 21(4): 233-236, 260.
- [23] 李慧. 天津城市社区文化建设与发展研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [24] 曹雷. 天津市河道淤泥脱水技术与资源化利用技术要求研究 [D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [25] 贾海峰, 马洪涛. 城市河湖底泥疏浚对水生态的影响分析与对策探讨 [J]. *北京水务*, 2006(1): 48-51.
- [26] 朱广伟, 陈英旭, 王凤平, 等. 城市河道底泥直接园林应用的初步研究 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2001, 27(1): 47-48.

究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2011.

- [7] ESWARAN H, KIMBLE J. Land quality assessment and monitoring: The next challenge for soil science [J]. *Pedosphere*, 2003, 13(1): 1-10.
- [8] 陈朝, 吕昌河. 基于综合指数的湖北省耕地质量变化分析 [J]. *自然资源学报*, 2010, 25(12): 2018-2029.
- [9] 聂艳, 周勇, 于婧, 等. 基于GIS和模糊物元贴适度聚类分析模型的耕地质量评价 [J]. *土壤学报*, 2005, 42(4): 551-558.
- [10] 张广星, 于东升, 张忠启, 等. BIO-NORM与EO耕地质量评价方法对比研究 [J]. *地理科学*, 2011, 31(8): 1012-1018.
- [11] 于东升, 张广星, 张忠启, 等. BIO-NORM与NORM耕地质量评价方法对比研究 [J]. *土壤学报*, 2011, 48(2): 238-245.
- [12] SHAO J A, GE X F, WEI C F, et al. Classification and gradation of cultivated land quality in Bishan County of Chongqing, China [J]. *Chinese geographical science*, 2007, 17(1): 82-91.
- [13] 夏家洪, 蔡道基, 夏增禄, 等. 土壤环境质量标准: GB 15618—1995 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [14] 吕贞龙, 王小兵, 仲晓春, 等. 基于地理信息系统的滨海盐土土壤肥力评价 [J]. *系统工程理论与实践*, 2008(9): 166-171.
- [15] 钟晓兰, 周生路, 赵其国. 长江三角洲地区土壤重金属污染特征及潜在生态风险评价: 以江苏太仓市为例 [J]. *地理科学*, 2007, 27(3): 395-400.
- [16] 廖启林, 刘聪, 许艳, 等. 江苏省土壤元素地球化学基准值 [J]. *中国地质*, 2011, 38(5): 1363-1378.