

DOI: 10.11766/trxb202109170501

何新莹, 聂艳, 王朴, 尹琛, 于雷. 基于改进灰靶模型的耕地质量评价方法与实证[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 1007–1016.

HE Xinying, NIE Yan, WANG Pu, YIN Chen, YU Lei. Cultivated Land Quality Evaluation Method and Demonstration Based on Improved Grey Target Model[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(4): 1007–1016.

基于改进灰靶模型的耕地质量评价方法与实证*

何新莹¹, 聂艳^{1†}, 王朴², 尹琛¹, 于雷¹

(1. 华中师范大学地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430079; 2. 武汉市园林科学研究院, 武汉 430081)

摘要: 耕地质量评价是掌握耕地质量现状、促进耕地资源可持续利用的基础。论文基于耕地“三位一体”保护的需要, 综合考虑土壤质量、生态质量和管理质量, 应用指标权重确定(Criteria Importance Though Intercriteria Correlation, 简称 CRITIC)法改进灰靶评价模型, 提出了一种三重质量维度下的县域耕地质量评价新方法, 并以赤壁市的耕地为例进行了实证。结果表明: 有机质含量等 17 个指标能够较好地土壤、生态、管理三个维度表征耕地多功能质量水平; 赤壁市耕地质量处于中等偏上水平, 靶心度 γ 的取值范围在 0.66~0.85 之间, 耕地质量级别以二、三级为主, 约占耕地总面积的 80.49%; 但耕地质量的区域空间差异较大; 赤壁市耕地管理质量差异较小, 土壤质量、生态质量对耕地综合质量的限制性较大, 是制约耕地生产能力的主要质量维度; 研究结果与现有的耕地质量等级评价结果基本一致, 表明改进后的灰靶评价模型不仅赋权和评价过程更为客观, 且利于测算耕地单维度质量, 是对已有耕地质量评价方法的重要补充, 旨在为新时代耕地多功能质量评价提供理论和借鉴。

关键词: 耕地; 质量维度; 指标体系; 灰靶模型; 赤壁市

中图分类号: S154.3; S17 **文献标志码:** A

Cultivated Land Quality Evaluation Method and Demonstration Based on Improved Grey Target Model

HE Xinying¹, NIE Yan^{1†}, WANG Pu², YIN Chen¹, YU Lei¹

(1. Hubei Provincial Key Laboratory for Geographical Process Analysis and Simulation, Central China Normal University, Wuhan 430079, China; 2. Wuhan Institute of Landscape Architecture, Wuhan 430081, China)

Abstract: 【Objective】Cultivated land is a special public resource and the most precious natural resource, which has a fundamental and guaranteeing role in national food security. As an important means to measure the internal basic conditions and external utilization level of cultivated land, cultivated land quality evaluation is the basis for grasping the status quo of cultivated land quality and promoting sustainable use of cultivated land resources. 【Method】Based on the needs of the “triad” protection of cultivated land, we applied the Criteria Importance Though Intercriteria Correlation (CRITIC) method to improve the gray target evaluation model. Also, we proposed a new method for the evaluation of county-level cultivated land quality based on the triple quality dimension including soil quality, ecological quality and management quality. The Chibi City was taken as the case

* 国家自然科学基金项目(4217011836)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 4217011836)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: nieyan@mail.ccnu.edu.cn

作者简介: 何新莹(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为耕地资源评价与保护。E-mail: hxya712089@126.com

收稿日期: 2021-09-17; 收到修改稿日期: 2022-03-02; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-04-24

study. 【Result】Results show that the organic matter content and 17 others indicators can characterize the multi-functional quality level of cultivated land under the triple quality dimensions of soil, ecology and management. The quality of cultivated land in Chibi City was at an upper-middle level, and the range of bullseye was 0.66–0.85. Furthermore, the regional spatial difference of cultivated land quality was large and the quality grade of cultivated land in Chibi City was mainly two and three, accounting for about 80.49% of the total cultivated land area. The cultivated land with a higher quality level was mainly distributed in the northwest and east of Chibi City while with a lower quality level was predominant in the central and northern urban areas and Shenshanzhen in the northeast. The difference in cultivated land management quality in Chibi City was small, soil quality and ecological quality were more restrictive to the comprehensive quality of cultivated land. 【Conclusion】The evaluation results of this study were consistent with the existing cultivated land quality grade evaluation results. This indicate that the improved gray target evaluation model was not only more objective in the weighting and evaluation process, but also conducive to measuring the single-dimensional quality of cultivated land. The improved gray target evaluation model was an important supplement to the existing cultivated land quality evaluation methods. This research can provide theoretical and methodological references for the evaluation of cultivated land multi-functional quality, which is in line with the new perspective of cultivated land quality evaluation in the new era.

Key words: Cultivated land; Quality dimension; Index system; Gray target model; Chibi City

耕地资源是保障国家粮食安全、实现乡村振兴和开展生态文明建设的基础^[1]。随着对耕地利用深度和广度的增加,诸如耕地资源数量减少、耕地质量下降和耕地生态环境恶化等影响耕地可持续发展的问题日益突出^[2]。为保护耕地有限资源,我国提出耕地占补平衡、永久基本农田划定、建设高标准农田等一系列政策。2017年中共中央国务院发布了《关于加强耕地保护和改进占补平衡的意见》,要求着力加强耕地数量、质量、生态“三位一体”保护,统筹兼顾耕地保护与经济社会发展和生态文明建设需求,对耕地保护提出更高要求。耕地质量评价是实现这一需求的重要途径,科学合理的耕地质量评价有助于及时掌握耕地质量的现状和动态变化,进而实现对耕地资源的可持续保护和建设^[3]。

随着耕地质量和耕地保护的内涵不断丰富,各研究学者对耕地质量评价的认识也日益深化,耕地质量评价从最初的重视耕地生产能力评价逐步演变为生产、生态与健康的综合评价^[4-12]。现有研究对耕地质量的评价已逐渐从单一维度向多维度转变,在评价指标的选取中考虑了常规物理、化学指标,如有机质、速效磷、全氮、pH、容重等,但对反映耕地生态状况的土壤生物指标考虑较少,而土壤生物指标作为耕地对管理措施变化的早期响应,应广泛应用于耕地质量评价中^[13],尤其是在新时代背景

下,耕地生态质量越来越受到人们的关注,已有研究成果较难满足国家对耕地数量、质量、生态“三位一体”精准管理的需求^[14],迫切需要探索基于新时代需求的耕地质量评价指标体系。灰靶理论(Grey Target Theory)是针对多极性、多目标决策问题提出的一种灰色关联分析理论^[15],目前已成功应用于水生态安全^[16]、林业经济发展水平^[17]、土地整治可持续性^[18]等复杂模糊系统的评价。针对耕地质量系统的信息不完全性、复杂性和不确定性等特点,灰靶模型能够进行模式识别、分级和优选,更准确、合理地反映评价对象,提高评价结果的客观性和科学性,但目前将灰靶理论应用于耕地质量评价的研究较少。本研究从耕地数量、质量、生态“三位一体”保护的需求出发,综合考虑耕地的土壤质量、生态质量和管理质量,融合现有耕地质量等级评价、土壤环境等相关指标及生物多样性指标、斑块联通度、田块规整度等创新性的景观生态指标,构建耕地质量评价理论框架,针对耕地质量系统的灰性,引进灰靶理论,利用指标权重确定(Criteria Importance Through Intercriteria Correlation,简称CRITIC)法对传统灰靶模型的等权不合理问题加以改进,并以赤壁市为例进行实证,以期为新时期耕地质量评价提供参考,为提出针对性的耕地质量保护和提升对策提供支撑。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

赤壁市位于湖北省东南部，地处 29°28′—29°55′N、113°32′—114°13′E 之间，长江中游的南岸，为幕阜低山丘陵与江汉平原的交接地带。地势由南向北倾斜，自南向北依次为海拔 500 m 左右的低山群、海拔 200 m 左右的丘陵、海拔 50 m 左右的冲积平原。赤壁市属于亚热带海洋性季风气候，年平均气温 16.9℃，降雨量 1 251~1 608 mm，四季分明，严寒期短，无霜期长。自南向北有蟠河、陆水、汀泗河纵贯全境，与黄盖湖、柳山湖、西梁湖等大小湖泊相连，并注入长江，构成黄盖湖、陆水、西梁湖 3 大水系。境内分布有红壤土、潮土、石灰岩土、紫色土、水稻土 5 个土壤类型。赤壁市辖 3 个街道、10 个镇，1 个乡，2 个场，全市土地面积为 17.10×10⁴ hm²，耕地面积 3.59×10⁴ hm²，占总面积的 20.99%，其中，水田 3.13×10⁴ hm²，旱地 4320 hm²，水浇地 234.1 hm²，水稻和玉米等粮食作物种植面积较小，油料作物、蔬菜等经济作物的种植面积较大。赤壁市耕地质量总体处于中高水平，部分低山丘陵区耕地质量较低。

1.2 数据来源

研究采用的空间数据主要包括：(1) 地形部位和坡度数据通过 SRTM DEM (Shuttle Radar Topography Mission, Digital Elevation Model) 数据分析及实地调查综合确定，SRTM DEM 数据源自地理空间数据云，空间分辨率为 90 m；(2) 行政区划矢量数据来自赤壁市土地变更调查数据库。属性数据主要包括：(1) 土层厚度、土壤质地、有机质、土壤 pH 等土壤质量数据及灌排条件、农田林网等管理质量数据来自 2018 年赤壁市耕地质量等级评价数据库及 2020 年赤壁市耕地资源质量分类数据库中的样点调查数据；(2) 田块规整度、斑块联通度、耕作距离、道路通达度及耕地集中连片度数据根据赤壁市土地变更调查数据，结合相关方法计算确定；(3) 生物多样性数据源自 2020 年赤壁市耕地资源质量分类中采集的样点检测数据。

1.3 三重质量维度下耕地质量评价理论框架

耕地是由自然环境及社会生产等因素综合作用形成的，以农业生产为主，兼具生态和社会功能的

特定土地利用类型^[11]。新时代耕地“三位一体”保护的需求要求对耕地资源进行数量、质量和生态的系统性保护，强调耕地生态系统的整体性。从耕地质量层面来看，则更加强调耕地资源的可持续利用和建设，保障和恢复耕地要素特性及耕地生态系统功能的稳定，而除了常规的土壤物理、化学属性外，土壤生物特性以及人类干扰措施对于耕地生态系统稳定性同样具有重要影响，是影响耕地质量的重要因素^[19]。从耕地可持续性利用和保护的需求出发，本文认为耕地质量是耕地内在要素及其组合特征综合作用而形成的多重功能质量的集合，包括耕地土壤质量、生态质量和管理质量三个维度，各质量维度内部具有强相关性，耕地综合质量是各维度质量的集成反映，受各维度质量的制约。其中，土壤质量反映土壤支持作物生长的基础条件，由土壤本身状态决定；生态质量不仅包括耕地生态系统维持自身稳定性的能力，同时应考虑耕地作为重要景观组成部分的生态系统服务功能^[20]；耕地管理质量是影响耕地利用效率和农民耕作意愿的重要质量维度，除了传统的灌排条件、农田林网及道路通达度等耕地基础设施配套条件外，耕作便利程度同样是耕地管理质量的重要组成部分，其直接影响农民耕作意愿，是衡量土地整治对耕地质量提升作用的重要层面。

耕地质量评价是借助反映耕地质量特性的指标，运用一定技术和程序来确定耕地质量水平的过程^[14]，本研究在分析耕地保护需求并界定耕地质量内涵的基础上，基于耕地不同质量维度构建了耕地质量评价的理论框架（图 1）。基于各维度质量的耕地质量综合评价能够全面反映耕地质量水平，同时对于耕地单维度质量的评价便于分析耕地质量的限制性指标，更好地服务于土地整治等耕地质量建设和提升实践。

1.4 三重质量维度下耕地质量评价指标体系

根据耕地质量评价理论框架，基于综合性、主导性、区域性和实用性原则，结合当前耕地质量评价相关研究^[5-10]，综合运用频度分析法和专家咨询法进行指标筛选，分别从耕地土壤质量、生态质量和管理质量三个耕地质量维度选取能够反映耕地质量各维度特征的 17 项指标构建耕地质量评价指标体系（表 1）。耕地土壤质量主要考虑宏观立地条件及微观土壤性状两个层面，宏观立地条件以地形部

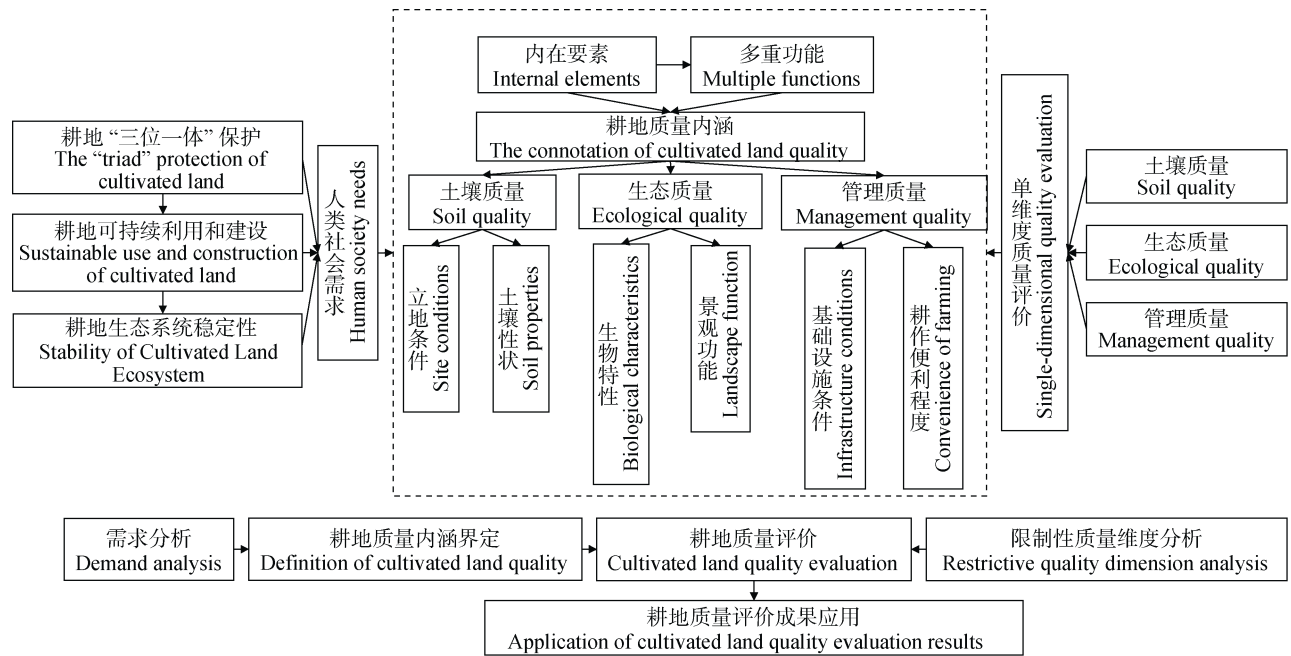


图 1 三重质量维度下耕地质量评价理论框架

Fig. 1 Theory framework of cultivated land quality evaluation based on triple quality dimensions

表 1 耕地质量评价指标体系

Table 1 Cultivated land quality evaluation index system

质量维度 Quality dimensions	准则层 Criterion layer	指标 Index
土壤质量 Soil quality	土壤性状 Soil properties	土层厚度、土壤质地、有机质、pH、有效磷、速效钾
	立地条件 Site conditions	地形部位、坡度
生态质量 Ecological quality	生物特性 Biological characteristics	生物多样性
	景观功能 Landscape function	景观连通性、斑块集聚度
管理质量 Management quality	基础设施条件 Infrastructure conditions	灌溉条件、排水条件、农田林网、道路通达度
	耕作便利程度 Convenience of farming	耕作距离、田块规整度

位和坡度表征，反映土壤所处的宏观地貌背景；土壤性状主要考虑土壤的土层厚度、土壤质地、有机质、pH 等微观物理化学指标^[5]。耕地生态质量除了选取生物多样性指标反映耕地生物特性外，同时纳入景观连通度和斑块集聚度来反映耕地的景观多功能性，其中，景观连通度用于衡量耕地的景观连通功能，利用单个斑块对整体连通度的贡献度表示，采用景观生态学中的整体连通性指数（IIC）计算，具体运算在 Confor Sensinode2.2 软件中进行^[21]；斑块集聚度指耕地的集中连片程度，是衡量景观美学功能的重要指标，采用图斑面积表示，值越大代表斑块集聚度越高。耕地管理质量由田间基础设施配套条件和耕作便利程度决定，其中耕作便利程度利

用耕作距离和田块规整度两个指标来表征^[11]。耕作距离为各评价单元距行政村中最近居民点的直线距离，利用 ArcGIS10.2 软件中的缓冲区分析功能计算^[22]；田块规整度是对田块边缘复杂性的度量，借用景观生态学中斑块分维数指数 FRAC（Fractal Dimension）^[23]来表达。

1.5 CRITIC 法

CRITIC 法是利用指标之间的对比强度和冲突性来综合衡量指标客观权重的方法^[24]，在考虑指标变异性大小的同时兼顾指标之间的相关性，是一种更加客观的赋权法^[25]。指标之间的对比强度以标准差的形式来表现，标准差越大，说明各方案之间的取值差距越大，权重会越高；冲突性用相关系数表

示，相关性越强，冲突性越小，权重会越低。二者结合构成的综合权数越大，则指标的权重越高。

CRITIC 法的表达式为：

$$P_j = S_j \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (1)$$

式中， P_j 表示第 j 个指标所包含的信息量， S_j 为第 j 个指标的标准差，表示第 j 个指标的对比强度， r_{ij} 为第 i 个评价指标与第 j 个评价指标的相关系数，用来量化指标之间的冲突性。

则第 j 个指标的 CRITIC 权重表示为：

$$W_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^n P_j} \quad (2)$$

1.6 灰靶模型

灰靶理论是处理模式序列的灰色关联分析理论，其原理是根据各指标的极性确定标准模式，即靶心，将各模式与标准模式一同构成灰靶，并将待评模式与标准模式进行比较，以此识别待评模式接近靶心的程度，即靶心度，基于靶心度来进行模式识别、分级和优选，确定评估等级。传统灰靶模型的核心步骤是靶心度的计算^[15]，公式如下：

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma[x_0(A_k), x_i(A_k)] \quad (3)$$

式中， $\gamma(x_0, x_i)$ 为待评模式 x_i 的靶心度； $\gamma(x_0(A_k),$

$x_i(A_k))$ 代表 A_k 指标的靶心系数； n 代表模式中的指标个数。

根据传统灰靶模型，靶心度为相应模式中各评价指标对应靶心系数的均值，即各评价指标对应靶心系数的等权相加，并未考虑指标权重，方法本身存在不合理性，会直接导致评价结果准确度降低^[17]。因此本文将 CRITIC 权重计算引入靶心度求解，将其进行加权改进，既增加了客观性也更符合实际。改进后的靶心度计算公式为：

$$\gamma(x_0, x_i) = \sum_{k=1}^n \omega_k \gamma[x_0(A_k), x_i(A_k)] \quad (4)$$

式中， (x_0, x_i) 表示待评模式 x_i 的靶心度； ω_k 表示 A_k 指标的权重； $\gamma(x_0(A_k), x_i(A_k))$ 代表 A_k 指标的靶心系数。

2 结果

2.1 评价单元和指标权重的确定

赤壁市耕地质量评价的对象是行政区域范围内的所有耕地，依据赤壁市土地变更调查数据库，提取其中的耕地地类图斑作为评价单元，全市评价单元共计 16 091 个，总面积 $3.59 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。主要分布在赤壁市东北部的盆地和西北部的中低阶平原区，南部低山丘陵区耕地分布较少。

各评价指标的客观权重采用 CRITIC 法(式(1)、式(2))计算，结果如表 2 所示。

表 2 赤壁市耕地质量评价指标权重

Table 2 Weight of cultivated land quality evaluation index in Chibi City

指标 Index	权重 Weight	指标 Index	权重 Weight
A1 土层厚度 Soil thickness	0.047 8	A10 景观连通性 Landscape connectivity	0.045 4
A2 土壤质地 Soil texture	0.082 0	A11 斑块集聚度 Plaque concentration	0.058 7
A3 有机质 Organic matter	0.066 5	A12 灌溉条件 Irrigation conditions	0.053 3
A4 pH	0.060 8	A13 排水条件 Drainage conditions	0.043 3
A5 有效磷 Available phosphorus	0.064 2	A14 农田林网 Farmland forest net	0.031 0
A6 速效钾 Available potassium	0.121 0	A15 道路通达度 Road accessibility	0.057 8
A7 地形部位 Terrain parts	0.058 4	A16 耕作距离 Tillage distance	0.054 5
A8 坡度 Slope	0.058 0	A17 田块规整度 Field regularity	0.036 4
A9 生物多样 Biodiversity	0.060 9	—	—

2.2 灰靶评价模型

(1) 构建标准模式 $w_0(A_k)$ 。每一个评价单元为一个待评模式, 对于耕地质量而言, 土层厚度、土壤质地、有机质、有效磷、速效钾、地形部位、生物多样性、景观连通性、斑块集聚度、灌溉保证率、排水条件、农田林网、道路通达度、田块规整度为正向指标, 具有极大值特性, 故此指标序列的标准模式为 $w_0(A_k) = \max\{A_k\}$ ($k=1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17$)。地形坡度、耕作距离为逆向指标, 具有极小值特性, 则此指标序列的标准模式为: $w_0(A_k) = \min\{A_k\}$ ($k=8, 16$)。土壤 pH 则具有适中极性, 根据指标特性确定, 取 6.8 作为标准。综上, 标准模式序列为 $w_0 = \{w_0(A_1), w_0(A_2), w_0(A_3), w_0(A_4), \dots, w_0(A_{17})\} = \{68, 100, 25, 6.8, 19, 150, 100, 100, 1, 0.303, 1, 1, 1, 1, 1, 2.55, 173.99\}$

(2) 进行灰靶变换。令 T 为灰靶变换, 靶心 $Tw_0 = x_0 = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$, 则各指标进行灰靶变换可得:

$$Tw_1(1) = x_1(1) = \frac{\min[w_1(A_1), w_0(A_1)]}{\max[w_1(A_1), w_0(A_1)]} = \frac{\min\{62, 69\}}{\max\{62, 69\}} = 0.8986$$

$$Tw_1(2) = x_1(2) = \frac{\min[w_1(A_2), w_0(A_2)]}{\max[w_1(A_2), w_0(A_2)]} = \frac{\min\{100, 100\}}{\max\{100, 100\}} = 1$$

.....

$$Tw_1(17) = x_1(17) = \frac{\min[w_1(A_{17}), w_0(A_{17})]}{\max[w_1(A_{17}), w_0(A_{17})]} = \frac{\min\{0.3934, 173.99\}}{\max\{0.3934, 173.99\}} = 0.0023$$

则有: $Tw_1 = x_1 = (x_1(1), x_1(2), x_1(3), x_1(4), \dots, x_1(16), x_1(17)) = (0.8986, 1, 0.7119, \dots, 0.0023)$

同理, 对待评模式 X_2-X_{16091} 进行灰靶变换得到 x_2-x_{16091} , 最终可得由 $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{16091})$ 组成的矩阵。

(3) 确定灰关联差异信息。空间令差异信息集 $\Delta = \{\Delta_{0i}(A_k), i \in I = \{1, 2, 3, \dots, 16091\}, k \in K = \{1, 2, 3, \dots, 17\}\}$, 其中, $\Delta_{0i}(A_k) = |x_0(A_k) - x_i(A_k)|$, 表示 A_k 指标下, 待评模式 X_i 与标准模式 X_0 的差异信息。则待评模式 X_1 的差异信息为 $\Delta_{01}(A_k) = [\Delta_{01}(A_1), \Delta_{01}(A_2), \Delta_{01}(A_3), \Delta_{01}(A_4), \dots, \Delta_{01}(A_{17})] = (0.1014, 0, 0.2881, \dots, 0.9997)$

同理, 可求得待评模式 X_2-X_{16091} 的差异信息, 得到由 $(\Delta_{01}, \Delta_{02}, \Delta_{03}, \Delta_{04}, \dots, \Delta_{016091})$ 组成的矩阵。最终可得: $\Delta_{0i}(\max) = 1, \Delta_{0i}(\min) = 0$ 。

(4) 计算靶心系数。靶心系数 $\gamma(x_0(A_k), x_i(A_k))$

$$= \frac{\min_i \min_k \Delta_{0i}(A_k) + 0.5 \max_i \max_k \Delta_{0i}(A_k)}{\Delta_{0i}(A_k) + 0.5 \max_i \max_k \Delta_{0i}(A_k)} = \frac{0.5}{\Delta_{0i}(A_k) + 0.5}$$

则有 $\gamma(x_0(1), x_1(1)) = 0.8313, \gamma(x_0(1), x_2(1)) = 1, \gamma(x_0(1), x_3(1)) = 0.0050, \dots, \gamma(x_0(1), x_{17}(1)) = 0.0050$ 。同理, 求得待评模式 X_2-X_{16091} 中各指标的靶心系数, 得到由靶心系数 $\gamma(x_0(A_k), x_1(A_k))$ 组成的矩阵。

(5) 计算靶心度。将得到的靶心系数和各指标相应的权重值代入式(4), 计算每个待评模式的综合靶心度, 得到: $\gamma(x_0, x_1) = 0.7470; \gamma(x_0, x_2) = 0.7442; \gamma(x_0, x_3) = 0.7353; \dots, \gamma(x_0, x_{16091}) = 0.7640$ 。同理, 对土壤质量、生态质量和管理质量三个质量维度分别组成的灰靶模型进行评价, 计算出每个质量维度的靶心度。

2.3 赤壁市耕地质量评价结果

根据灰靶模型分析结果, 赤壁市耕地质量的靶心度 γ 的取值范围在 0.66 ~ 0.85 之间, 按照等分取整原则进行级别划分, 最终将赤壁市耕地质量情况分为 5 个级别, 各级别耕地的面积和所占比例如表 3 所示。根据级别划分结果, 形成耕地质量级别分布图(图 2a)。同理, 根据各质量维度的靶心度评价结果, 按照相应分级标准制作出土壤质量级别分布图、生态质量级别分布图、及管理质量级别分布图, 如图 2b、图 2c、图 2d 所示。

根据表 3 耕地质量评价结果, 各级耕地面积中: 二、三级地的面积较大, 占总耕地面积的 80.49%, 一级地和五级地占比较少, 耕地质量总体处于中等偏上水平。

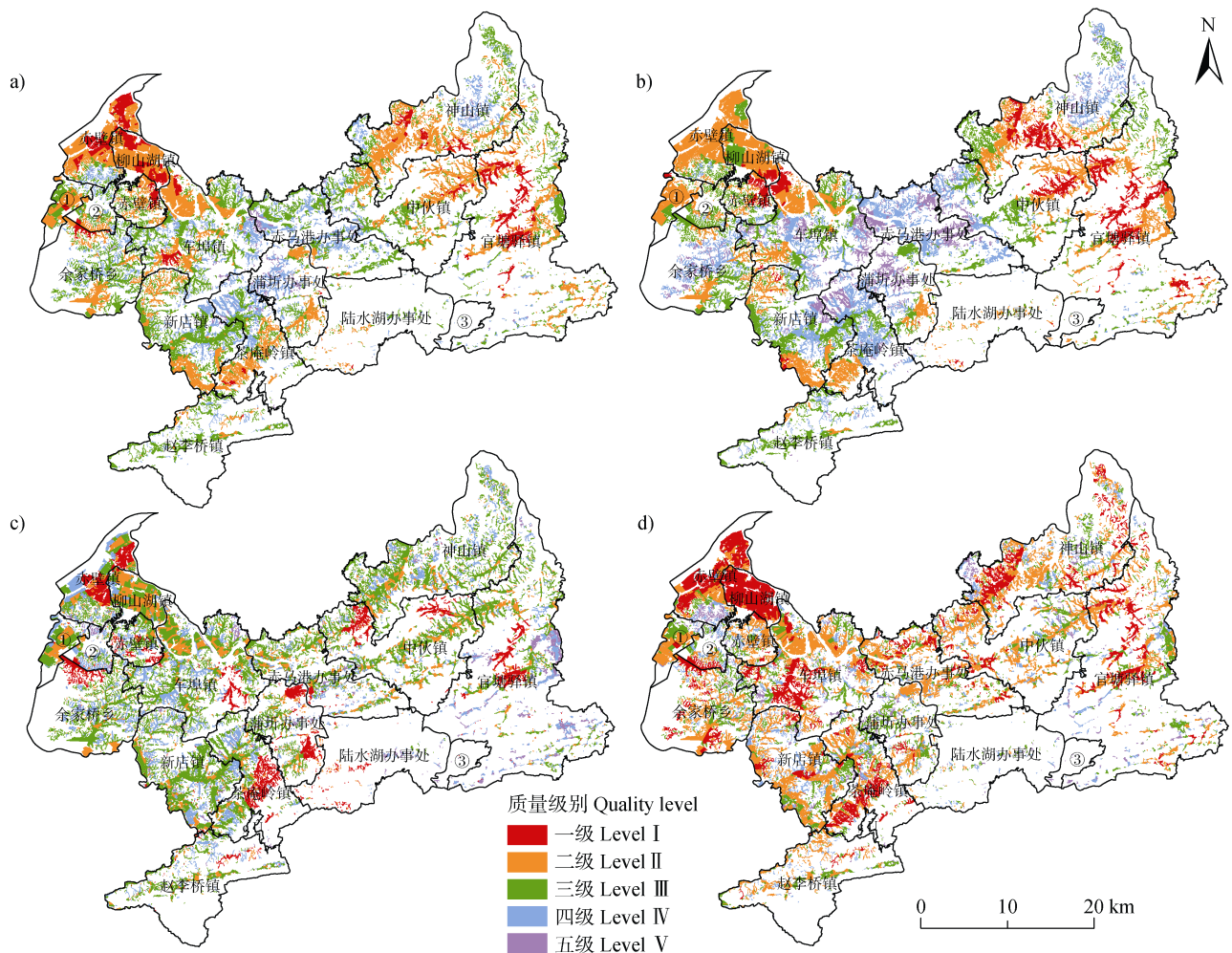
表 3 赤壁市耕地质量评价结果

Table 3 Evaluation results of cultivated land quality in Chibi City

等级	靶心度	面积	占比
Grade	Bullseye	Area/hm ²	Proportion/%
一级 Level I	>0.79	1 625	4.43
二级 Level II	0.76~0.79	16 851	45.96
三级 Level III	0.73~0.76	12 624	34.43
四级 Level IV	0.70~0.73	5 085	13.87
五级 Level V	<0.70	481	1.31

从空间分布(图 2a)来看,耕地质量级别较高的一级地和二级地,主要分布在西北部赤壁镇和柳山湖镇,东部和西南部部分乡镇有零散分布。从各

质量维度的级别分布图来看,这些地区的土壤质量、生态质量和管理质量均处于较高水平。从土壤质量的分布来看(图 2b),这些区域多位于中低阶平原、宽谷盆地及丘陵下部,土壤本底条件较好,土壤质地以中壤土为主,有机质含量和养分元素含量较高,其中东部地区的中伙镇、神山镇和官塘驿镇一级地分布较多,土壤质量最好。从生态质量的分布来看(图 2c),这些地区地形较为平整,地面坡度较小,斑块集聚度及景观连通性均较好,东部的官塘驿镇和西南部的官塘林场、茶庵岭镇的生物多样性较为丰富,故生态质量较高;从管理质量的分布来看(图 2d),这些地区的管理质量均较高,一级地分布广泛。



注:①黄盖湖农场,②沧湖生态农业开发区,③官塘林场。Note:①Huanggaihu Farm,②Canghu Ecological Agriculture Development Zone,③Guantang Forest Farm.

图 2 耕地质量等级(a)、土壤质量等级(b)、生态质量等级(c)、管理质量等级(d)分布图

Fig. 2 Spatial distribution maps of cultivated land quality level (a), soil quality level (b), ecological quality level (c), management quality level (d)

耕地质量级别一般的三级地分布较广泛,在各镇均有零散分布。从各质量维度的级别分布来看,这些区域的土壤质量和生态质量水平一般,以三、四级地为主,而管理质量以二级地为主,与耕地质量级别较高的一、二级地差距较小。

耕地质量等级较低的四级地和五级地主要分布于中部和北部城区及西北部的神山镇。这些地区的管理质量水平较高,以二、三级地为主,西北部的神山镇有少量四、五级地分布。但土壤质量和生态质量的级别低,以四、五级地为主,尤其是赤壁市中部和北部城区,受人类活动影响较大,土壤养分含量较低,例如北部的赤马港办事处,区域内平均有机质含量为 $18.86 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均有效磷含量仅为 $15.44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,为各镇最低水平,根据本区域内的一处生物多样性采样点的检测结果,该点的 chao 值、 ace 值、 shannon 值、 simpson 值分别为 2 519、2 423、5.67、0.019,与其他各点的平均值 6 043、6 405、6.83、0.004 差距极大,且该点的土壤 pH 为 5.78,酸性较强,土壤质地主要为砂壤、重壤和黏土,较差的土壤质量和生态质量直接影响其耕地综合质量。

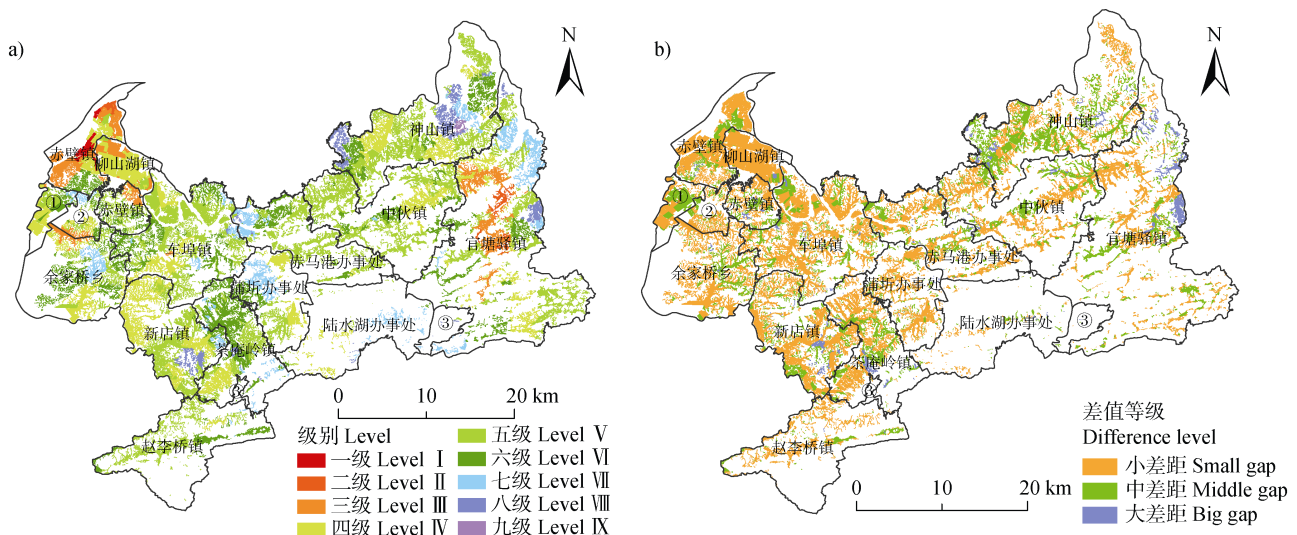
通过以上分析可以看出,赤壁市耕地质量状况总体较好,其管理质量整体差异不大,土壤质量和生态质量对整个区域的耕地综合质量限制较大,是

制约赤壁市耕地质量提高的主要质量维度。

2.4 与耕地质量等级评价结果对比

为衡量评价结果的准确性,将本研究的评价结果与 2018 年赤壁市耕地质量等级评价结果进行定性和定量对比。其中,定量对比采用 Z-score 模型对对比数据进行标准化,以解决各结果由于选取指标和计算方法的不同而无法直接进行定量比较的问题,将两组标准化数值做减后取绝对值,即能够定量表示两组数据之间的差距,然后利用自然断点法将差值划分为大差距、中差距和小差距三个区间,形成评价结果差距对比图,如图 3 所示。

依据《耕地质量等级》及农业农村部耕地质量监测保护中心《关于印发〈全国耕地质量等级评价指标体系〉的通知》的规定,赤壁市属于长江中下游区中的江南丘陵山地农林区,共选取清洁程度、生物多样性、障碍因素、有效土层厚度、质地构型、农田林网、地形部位、容重、 pH 、耕层质地、排水能力、灌溉能力、速效钾、有效磷、有机质共 15 项评价指标,结合赤壁市实际,采用特尔菲法和隶属度函数相结合的方法对指标进行无量纲化处理,并赋予相应分数和数值;采用层次分析法确定指标权重;采用累加法和综合指数法计算评价单元的耕地质量综合指数;根据长江中下游区制定的等级划分标准,划定赤壁市耕地质量等级。



注:①黄盖湖农场,②沧湖生态农业开发区,③官塘林场。Note:①Huanggaihu Farm, ②Canghu Ecological Agriculture Development Zone, ③Guantang Forest Farm.

图3 2018年耕地质量等级分布图(a)、评价结果差距对比图(b)

Fig. 3 Spatial distribution of cultivated land quality grade (a), Comparison of gaps in evaluation results (b)

依据耕地质量等级评价成果，赤壁市耕地质量共划分为九个等级（图 3a），耕地质量水平较高的一、二、三级地面积占总耕地面积的 9.44%，主要分布在西北部的和东部；质量水平中等的四、五、六级地面积约占总耕地面积的 80.64%，在全市均有分布，其中六级地主要分布在中部和西部地区；质量水平较低的七、八、九级地共占总面积的 9.92%，主要分布在中部，北部和东北部以及西南部的新店镇。从耕地质量等级数量组成和空间分布来看，两成果的趋势较为一致。

根据定量对比结果（图 3b），评价结果小差距的耕地占总面积的比例高达 66.01%，中差距的耕地占 30.42%，大差距的耕地仅占 3.58%。评价指标选择及权重的差异是两种评价结果存在差距的主要原因，耕地质量等级评价以提升农产品质量、达到国家粮食安全和食物安全的需求为目标，更侧重于对耕地地力的评价，指标选取上更多考虑土壤本底质量，管理质量维度中仅考虑了灌溉条件、排水条件和农田林网化三项指标，并未考虑田块连片度和道路通达度等直接影响耕作便利程度的指标，且在耕地质量等级评价中并未考虑耕地的生态质量。

3 结 论

（1）赤壁市耕地质量总体处于中等偏上水平，二级地和三级地数量较多，占总耕地面积的 80.49%。级别较高的耕地主要分布在赤壁市西北部和东部地区，级别较低的耕地主要分布在中部和北部城区及东北部的神山镇，耕地质量的区域空间差异较大。耕地管理质量在全市范围内差异较小，土壤质量和生态质量是制约耕地质量提高的主要质量维度。（2）针对耕地系统的复杂性，利用基于 GRITIC 法改进的灰靶模型进行耕地质量评价，评价结果能够客观反映耕地质量水平；同时该方法便于测算单维度的耕地质量，反映耕地质量不同层次的需求，具有灵活性和实用性，能够更好地为限制性质量维度的识别和耕地质量提升对策的制定提供依据。（3）研究中的土壤生物多样性指标主要根据三调耕地资源质量分类的样点检测数据获取，样点数目较少，导致部分区域的生物多样性数据不够精确，一定程度上会影响耕地质量评价结果。此外，由于涉及的指标较多，数据源较多，指标之间存在着年

份不同的问题，这是下一步研究中需要重点加强的方面，以提高评价结果的现势性和客观性。

参考文献 (References)

- [1] Fan Y T, Jin X B, Xiang X M, et al. Evaluation and spatial characteristics of arable land multifunction in southern Jiangsu[J]. Resources Science, 2018, 40 (5): 980—992. [范业婷, 金晓斌, 项晓敏, 等. 苏南地区耕地多功能评价与空间特征分析[J]. 资源科学, 2018, 40 (5): 980—992.]
- [2] Nie Y, Peng Y T, Yu J, et al. Evaluation on farmland ecological security in Hubei Province based on quantum genetic projection pursuit model[J]. Economic Geography, 2015, 35 (11): 172—178. [聂艳, 彭雅婷, 于婧, 等. 基于量子遗传投影寻踪模型的湖北省耕地生态安全评价[J]. 经济地理, 2015, 35 (11): 172—178.]
- [3] Zhang B B, Kong X B, Yun W J, et al. A review on quality and monitoring of arable land in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20 (2): 216—222. [张蚌蚌, 孔祥斌, 郟文聚, 等. 我国耕地质量与监控研究综述[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20 (2): 216—222.]
- [4] Kong X B. The connotation and realization path of ecological governance of cultivated land protection in China[J]. China Land Science, 2020, 34 (12): 1—10. [孔祥斌. 中国耕地保护生态治理内涵及实现路径[J]. 中国土地科学, 2020, 34 (12): 1—10.]
- [5] Shen R F, Chen M J, Kong X B, et al. Conception and evaluation of quality of arable land and strategies for its management[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49 (6): 1210—1217. [沈仁芳, 陈美军, 孔祥斌, 等. 耕地质量的概念和评价与管理对策[J]. 土壤学报, 2012, 49 (6): 1210—1217.]
- [6] Kong X B, Liu L W, Qin J. Arable land evaluation based on the household land use behavior in Daxing district of Beijing[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63 (8): 856—868. [孔祥斌, 刘灵伟, 秦静. 基于农户土地利用行为的北京大兴区耕地质量评价[J]. 地理学报, 2008, 63 (8): 856—868.]
- [7] Ma R M, Ma R H, Han D M, et al. Construction of cultivated land quality evaluation system in provincial level based on multilevel indicators[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 (16): 249—257. [马瑞明, 马仁会, 韩冬梅, 等. 基于多层次指标的省域耕地质量评价体系构建[J]. 农业工程学报, 2018, 34 (16): 249—257.]
- [8] Fu G Z, Bai W Q. Advances and prospects of evaluating cultivated land quality[J]. Resources Science, 2015, 37 (2): 226—236. [付国珍, 摆万奇. 耕地质量评价研究进展及发展趋势[J]. 资源科学, 2015, 37 (2): 226—236.]
- [9] Xin Y N, Fan S Y, Kong X B, et al. Evaluation of

- cultivated land quality based on four quality dimensions[J]. *Resources Science*, 2018, 40(4): 737—747. [辛芸娜, 范树印, 孔祥斌, 等. 四重质量维度下的县域耕地质量评价方法研究[J]. *资源科学*, 2018, 40(4): 737—747.]
- [10] Wang Z F, Tian J F. Study on comprehensive evaluation and promotion path of cultivated land resources use security in Hunan Province[J]. *China Land Science*, 2021, 35(1): 48—58. [王兆峰, 田俊峰. 湖南省耕地资源利用安全综合评价与提升路径研究[J]. *中国土地科学*, 2021, 35(1): 48—58.]
- [11] Wen L Y, Kong X B, Xin Y N, et al. Evolution of cultivated land quality connotation and its recognition[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(3): 156—164. [温良友, 孔祥斌, 辛芸娜, 等. 对耕地质量内涵的再认识[J]. *中国农业大学学报*, 2019, 24(3): 156—164.]
- [12] Du G M, Liu Y S, Yu F R, et al. Evolution of concepts of cultivated land quality and recognition[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(14): 243—249. [杜国明, 刘彦随, 于凤荣, 等. 耕地质量观的演变与再认识[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(14): 243—249.]
- [13] Si S C, Wu Y C, LI Y, et al. The current research progress and prospects of cultivated and grassland soil health-A review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021. DOI: 10.11766/trxb202104090063. [司绍诚, 吴宇澄, 李远, 等. 耕地和草地土壤健康研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2021. DOI: 10.11766/trxb202104090063.]
- [14] Sun X B, Kong X B, Wen L Y. Evaluation index system of cultivated land quality and its development trend based on cultivated land elements[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(3): 739—747. [孙晓兵, 孔祥斌, 温良友. 基于耕地要素的耕地质量评价指标体系研究及其发展趋势[J]. *土壤通报*, 2019, 50(3): 739—747.]
- [15] Li S, Du J K, Zhang Z W, et al. Risk regionalization for flood hazard in southern Shaanxi Province based on grey target model and GIS[J]. *Yangtze River*, 2021, 52(7): 17—21. [李双, 杜建括, 张志伟, 等. 基于灰靶模型和GIS的陕南暴雨洪涝灾害风险区划[J]. *人民长江*, 2021, 52(7): 17—21.]
- [16] Zheng W. Evaluation of water ecological security in Guangzhou based on improved grey target model[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2018, 39(6): 72—77. [郑炜. 基于改进灰靶模型的广州市水生态安全评价[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(6): 72—77.]
- [17] Pan P G. Evaluation of forestry economic development level based on improved grey target model—A case study of western provinces in China[J]. *Journal of Leshan Normal University*, 2017, 32(2): 93—99. [潘平国. 基
- 于改进灰靶模型的林业经济发展水平评价——以西部省份为例[J]. *乐山师范学院学报*, 2017, 32(2): 93—99.]
- [18] Zhang J F, Hua S, Liu Y Z, et al. Sustainability assessment of land consolidation based on the improved grey target model—A case of Jiangsu Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(2): 153—160. [张俊凤, 花盛, 刘友兆, 等. 基于改进灰靶模型的土地整治可持续性评价研究——以江苏省为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(2): 153—160.]
- [19] Zu J, Hao J M, Chen L, et al. Analysis on trinity connotation and approach to protect quantity, quality and ecology of cultivated land[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(7): 84—95. [祖健, 郝晋珉, 陈丽, 等. 耕地数量、质量、生态三位一体保护内涵及路径探析[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(7): 84—95.]
- [20] Zhu Y H, Pu L J, Zhao C Y. Evaluation of landscape ecological quality—A case study in Wujiang County[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(2): 182—187. [朱永恒, 濮励杰, 赵春雨. 景观生态质量评价研究——以吴江市为例[J]. *地理科学*, 2007, 27(2): 182—187.]
- [21] Peng J, Liu Z C, Liu Y X, et al. Assessment of farmland landscape multifunctionality at county level in Beijing-Tianjin-Hebei area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(8): 2274—2285. [彭建, 刘志聪, 刘焱序, 等. 京津冀地区县域耕地景观多功能性评价[J]. *生态学报*, 2016, 36(8): 2274—2285.]
- [22] Ma H T. Study on the spatial correlation of cultivated land quality and landscape pattern—Taking Shengzhou as an example[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. [麻海涛. 耕地质量与耕地景观格局的耦合性研究——以嵊州市为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.]
- [23] Cai H S, Lin J P, Zhu D H. Cultivated land consolidation planning based on quality evaluation of cultivated land in Poyang Lake region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(5): 75—80. [蔡海生, 林建平, 朱德海. 基于耕地质量评价的鄱阳湖区耕地整理规划[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(5): 75—80.]
- [24] Bao Y L, Zhang H. Land ecological security assessment of Yunnan Province based on the CRITIC weighted gray target model[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2020, 41(2): 48—53. [包艳丽, 张洪. 基于CRITIC权灰靶模型的云南省土地生态安全评价[J]. *上海国土资源*, 2020, 41(2): 48—53.]
- [25] Zhang Y Z, Ren J L, Liu K, et al. The ecological security early warning measures and space-time pattern of Shandong Province[J]. *Economic Geography*, 2015, 35(11): 166—171, 189. [张玉泽, 任建兰, 刘凯, 等. 山东省生态安全预警测度及时空格局[J]. *经济地理*, 2015, 35(11): 166—171, 189.]

(责任编辑: 檀满枝)