

# 东莞市耕地环境质量的压力-状态-响应分析与评价

邱孟龙<sup>1</sup>, 王琦<sup>2</sup>, 陈俊坚<sup>2</sup>, 杨国义<sup>2</sup>, 李芳柏<sup>2</sup>, 刘黎明<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 广东省生态环境与土壤研究所, 广东省农业环境综合治理重点实验室, 广州 510650)

**摘要:** 基于“压力-状态-响应”模型建立了耕地环境质量评价框架及其指标体系。以东莞市为研究样区, 采集 182 个耕地土壤样品, 测定其重金属含量, 结合东莞统计年鉴中的社会经济数据, 对东莞市耕地环境质量进行评价, 并通过协调度模型对其稳定性进行分析。结果表明: 东莞市 28.2% 的耕地处于良好和较好水平, 主要分布在北部河网平原区, 该区作为供水工程水源地, 环境受到严格保护; 56.1% 的耕地处于警戒水平, 处于较差水平的耕地占总面积的 15.7%, 没有耕地处于极差水平。主要影响因素为经济发展和工业“三废”排放压力、耕地自然性状及其耕作管理状态、农药化肥过量施用等不合理的农户响应措施。压力、状态、响应指数协调度较低的乡镇有南城、望牛墩、沙田、长安, 其耕地环境质量不稳定, 是耕地环境质量管理管控的重点区域。

**关键词:** 耕地环境质量; “压力-状态-响应”框架; 协调度; 评价模型; 东莞市

中图分类号: X820.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)03-0524-08 doi:10.11654/jaes.2015.03.015

## Analysis and Assessment of Environmental Quality of Farmland in Dongguan City Based on “Press-State-Response” Framework

QIU Meng-long<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>2</sup>, CHEN Jun-jian<sup>2</sup>, YANG Guo-yi<sup>2</sup>, LI Fang-bai<sup>2</sup>, LIU Li-ming<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Agricultural Environment Pollution Integrated Control, Guangdong Institute of Eco-Environmental and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China)

**Abstract:** A framework and indicator system of environmental quality assessment of farmland were constructed based on the “Press-State-Response” (PSR) model. Taking Dongguan city as a case study, “Press-State-Response” model was successfully developed using 182 farmland soil samples and socioeconomic data obtained from Dongguan statistical yearbook. The indicator system was thus applied to assess the environmental quality of farmland and indexes of pressure, state and response were also analyzed. Environmental quality of farmland was divided into 5 grades: superior, good, warning, low and poor. Coordination degree was used to analyze the stability of environmental quality of farmland. Results showed that 28.2% of total farmland in Dongguan was superior or good, which is mainly distributed in river network area in the north of Dongguan. Fifty six point one percent (56.1%) was warning and 15.7% low. The pressure from economic development and industrial waste discharge, farmland natural characteristics, and unreasonable agricultural practices and managements were the major factors influencing farmland environmental quality. Low coordination degree of each PSR subsystem was found in Nancheng, Wangniudun, Shatian and Changan township, indicating unstable farmland environmental quality in these townships. The present study would be useful for a targeted soil protection plan and sustainable use of land resources in Dongguan city.

**Keywords:** farmland environmental quality; “Press-State-Response” framework; coordination degree; evaluation model; Dongguan City

近年来,经济发达地区耕地环境质量评价和管理成为国内外研究热点。Sun 等<sup>[1]</sup>借鉴 Hakanson 潜在生

态危害指数法,根据不同参考标准对上海市崇明岛农业土壤环境质量进行了评价并指出大气沉降是当地重金属污染的重要来源; Mohammad 等<sup>[2]</sup>和 Varol<sup>[3]</sup>则通过构建污染系数(CF)、污染负荷指数(PLI)、地质累积指数( $I_{geo}$ )以及富集系数(EF)对相关区域农业土壤重金属污染状况进行评价分析。这些研究主要集中在对耕地健康和清洁状态的静态评价方面,而对自然、

收稿日期: 2014-10-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2013AA06A209); 广东省科技计划项目(2012A030700003)

作者简介: 邱孟龙(1988—),男,山东胶州人,博士生,研究方向为耕地环境质量评价及其风险评价管理。E-mail: qml7886@163.com

\* 通信作者: 刘黎明 E-mail: liulm@cau.edu.cn

人为因素对耕地环境质量的潜在压力和反馈调节作用考虑较少。

“压力-状态-响应”(PSR)模型最初是为建立环境评价指标体系而提出的,旨在衡量一定状态下生态环境所承受的压力、状态条件的变化以及社会对这些压力和变化所作的响应<sup>[4]</sup>。随着环境压力的不断增加,基于PSR模型的土地质量指标体系成为国际土壤科学研究的热点问题<sup>[5-7]</sup>。土壤环境质量是土壤质量的一个重要组成部分,在耕地土壤环境质量评价研究中引入PSR框架,可以综合考虑自然和人类活动因素,构建反映耕地环境质量变化因果关系的评价指标体系,使评价结果不仅反映耕地环境质量现状,而且包含其潜在发展趋势。

东莞市作为珠江三角洲经济发达区的典型代表,近30年来凭借区位优势迅速实现了工业化和城市化,成为全球性制造业基地。然而,经济社会迅速发展的同时也产生了大量的工业“三废”和生活垃圾,给环境带来了巨大压力。大量研究表明,东莞市耕地面临严重的重金属污染威胁,其中Hg的最高检出值为广东省土壤背景值的12.7倍<sup>[8-10]</sup>。人口、经济急剧增长带来的环境压力以及不合理的耕作行为是导致耕地污染及其环境质量恶化的重要原因<sup>[11-13]</sup>。但这些研究都仅仅考虑了土壤重金属浓度,没有考虑造成污染的社会经济因素。本文基于PSR框架,综合考虑了影响耕

地环境质量的压力、状态和响应3个方面的影响因素,构建了一个耕地环境质量相对评价指标体系,并以东莞市为案例区进行评价,客观反映了研究区不同行政单元之间耕地环境质量的差异情况,既为不同耕地环境质量区域合理制定土壤整治和保护措施提供了科学依据,也为类似经济发达地区耕地资源的持续利用和合理管理提供了参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

#### 1.1.1 土样采集与测定

东莞市(东经113°31'~114°15';北纬22°39'~23°09')位于广东省中南部,面积2465 km<sup>2</sup>,2011年全市耕地面积38 200 hm<sup>2</sup>,地形自东南低山丘陵区逐渐向西北低丘、台地与河谷平原区过渡。根据研究区耕地分布、工业布局及作物种植类型,并参考1:50 000土壤图,遵循土壤样品采集均匀性与代表性原则,2011年在全市范围内采集耕地表层土样(0~20 cm)共182个(图1),每个样点采用多点(5个点)综合取样,混匀后采用四分法保留1 kg样品。土壤样品风干后,去除砾石、动植物残体等杂物,过筛备用。

土壤样品经盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消解后,Hg含量采用冷原子吸收法测定,As含量采用DDC-Ag分光光度法测定,Cu、Zn、Ni、Cr、Cd和Pb含量采用

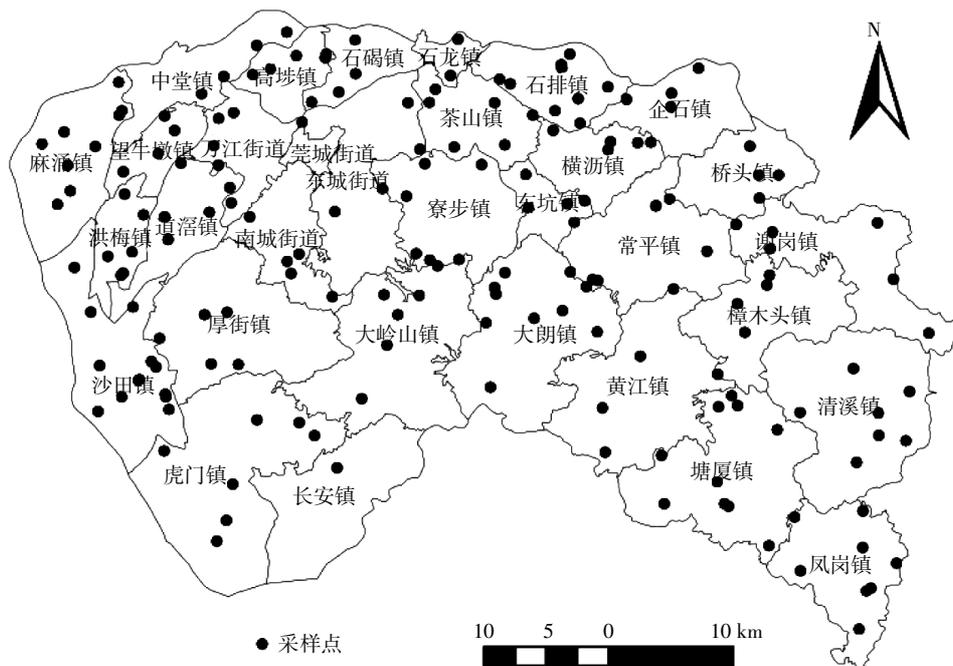


图1 东莞市土壤样品采样点分布图

Figure 1 Distribution of soil sampling sites in Dongguan

原子吸收分光光度法测定<sup>[14]</sup>。土壤 pH 采用电位法(水:土=2.5:1),有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定。

### 1.1.2 社会经济数据

社会经济方面的数据主要依据 2012 年《东莞统计年鉴》、《广东统计年鉴》以及《广东农村统计年鉴》(均为 2011 年数据的统计)。土地利用空间数据来源于 2011 年东莞市土地利用现状图(1:10 000)。

## 1.2 耕地环境质量评价指标体系的构建

### 1.2.1 指标体系框架

耕地环境质量指在一定的时空范围内,耕地自身性状对其持续利用及其他环境要素,特别是人类和其他生物有机体的生存、繁衍以及社会经济发展的适宜程度。耕地环境质量评价体系涵盖耕地自身性状及其影响因素两方面。基于 PSR 模型的耕地环境质量评价框架(图 2)利用压力和响应两个指标体系对耕地性状的影响因素进行评价,利用状态指标体系对耕地自身性状进行评价。

压力指标包括对耕地环境质量造成负荷或不利影响的自然和人为因素;状态指标指耕地环境质量的现状,包括土壤理化性状、污染状况以及土地利用状况等;响应指标描述管理者及政策制定者对外界压力、耕地环境质量状态所作出的反应和决策。在评价框架中,自然、经济、人口等因素对耕地环境质量施加压力,引起状态指标的变化,不同的耕地环境质量状态又会使政府和农户从宏观和微观两个层面上作出不同的响应措施,从而对耕地环境质量受到的压力进行调节。

综上所述,耕地环境质量评价框架的压力、状态

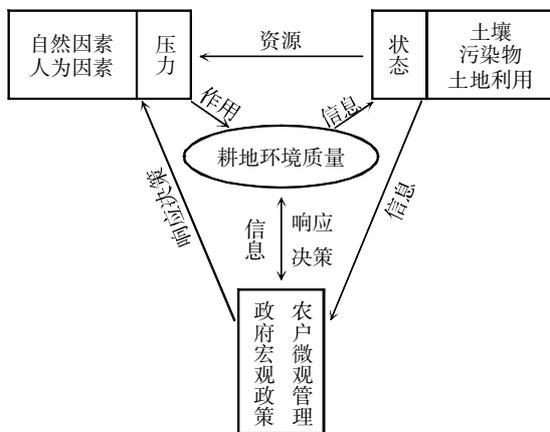


图 2 耕地环境质量评价的 PSR 框架

Figure 2 PSR framework of farmland environmental quality assessment

和响应三个方面相互制约、相互影响<sup>[15]</sup>,反映了耕地环境质量变化的因果关系,有助于决策者确定合适的土地政策和管理措施<sup>[16]</sup>。

### 1.2.2 评价指标的选取与计算

基于以上耕地环境质量评价框架,按照评价指标选取的主导性、空间变异性以及相对稳定性原则<sup>[17]</sup>,结合研究区的区域特点及数据的可获得性,遴选和构建研究区耕地环境质量评价指标体系,包括压力、状态、响应三个方面共 14 项指标(表 1)。由于研究区同属珠江东江流域且为同一行政辖区,灌溉水水质带来的自然因素压力以及政府宏观政策响应的差异不大,根据评价指标选取的差异性原则,二者在本研究中未予以考虑。

#### 1.2.2.1 压力指标

人均 GDP 反映经济发展水平带来的压力,目前广东省环境库兹涅茨曲线尚未达到拐点<sup>[18]</sup>,所以人均 GDP 与压力成正比,与耕地环境质量成反比,为负向指标,即:

$$RGDP = GDP/P$$

式中:RGDP 为人均 GDP;GDP 为总 GDP;P 为总人口。

人均耕地面积反映人口及土地利用强度对耕地环境质量的压力,人均耕地面积越大,压力越小,为正向指标,即:

$$RA = A/P$$

式中:RA 为人均耕地面积;A 为耕地总面积;P 为总人口。

种植业收入比例反映不同管理方式对耕地环境质量带来的压力,种植业收入比例越高,人们对耕地的管理投入越大,耕地环境质量退化可能性越小,为正向指标,即:

$$Z = Z/I$$

式中:Z 为种植业收入比例;ZI 为种植业收入;I 为总收入。

工业“三废”排放量反映工业活动带来的压力,考虑到数据的可获得性,本研究中使用研究区第二产业产值表示,为负向指标。

生活污水、垃圾排放量反映人口和人类生活带来的压力,结合数据的可获得性,使用研究区人口密度表示,为负向指标。

#### 1.2.2.2 状态指标

土壤 pH、质地和有机质反映耕地自然理化性状,对污染物的有效性有重要影响。其中土壤 pH 和有

质含量由土壤样品分析获得,土壤质地按照砂壤、壤土、粘壤、粘土、重粘土分别赋值 50、60、70、90、100。由于研究区地处红壤区,pH 偏酸性,随着 pH 值升高,重金属综合有效性降低;土壤质地越细、有机质含量越高对重金属束缚能力越强,污染物综合活性越低,三者均为正向指标。

路网密度反映研究区耕地交通状况,影响污染物沉降。路网密度越大,耕地受车辆污染的可能性越大,耕地环境质量也越差,为负向指标,即:

$$D=RS/S$$

式中: $D$  为路网密度; $RS$  为评价单元道路长度; $S$  为评价单元总面积。

菜地占耕地比例反映不同土地利用状态,菜地所占比例越高,耕地环境质量越好<sup>[19]</sup>,为正向指标,即:

$$V\%=VA/A$$

式中: $V\%$  为菜地占耕地比例; $VA$  为评价单元菜地面积; $A$  为评价单元耕地总面积。

内梅罗综合污染指数反映耕地遭受重金属污染的程度及其清洁状态,内梅罗综合污染指数越大耕地受污染越严重,耕地环境质量越差,为负向指标。内梅罗综合污染指数的计算依据土壤样品分析测得的重金属数据,具体计算方法参照路婕等<sup>[20]</sup>的文献。

#### 1.2.2.3 响应指标

化肥、农药及有机肥使用量均反映农户为应对人口、经济等各项压力作出的响应措施,各指标值越大表示响应程度越强,对耕地环境质量也越不利,因此各指标均为负向指标。

#### 1.2.3 评价指标的组合权重

本文采用 Delphi 法和层次分析(AHP)相结合的方法确定状态指标权重,这样既吸取了专家经验又避免了纯粹打分的主观任意性,是一种定性定量相结合的方法<sup>[21]</sup>。通过建立层次结构模型、构造判断矩阵、请专家填写判断矩阵、层次单排序与检验、层次总排序与检验五个步骤,得出各指标的组合权重及其结果,见表 1。

#### 1.2.4 综合评价

由于量纲的不同导致不同评价指标之间缺乏可比性,需要对原始数据进行标准化处理。本文采用极差法进行标准化处理,公式为

$$U_i=(X_i - X_{\min})/(X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$$U_i=(X_{\max} - X_i)/(X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中: $U_i$  为指标  $X_i$  标准化值; $X_i$  为评价指标  $i$  的原始值; $X_{\min}$  为评价指标  $i$  原始值中的最小值; $X_{\max}$  为评价指标  $i$  原始值中的最大值。正向指标利用公式(1)进行标准化处理,负向指标用公式(2)进行标准化处理。确定各指标权重与标准值后,利用加权求和模型公式(3)计算各评价单元的压力指数、状态指数、响应指数以及耕地环境质量综合评价指数。

$$A = \sum_{i=1}^n W_i \times X_i \quad (3)$$

式中: $A$  表示评价指数; $W_i$  表示评价指标  $i$  的权重; $X_i$  表示评价指标  $i$  的标准值; $n$  表示评价指标的个数。

按照耕地环境质量综合评价指数从低到高,将东莞市耕地环境质量从劣到优分为 5 个等级:[0,0.2]

表 1 广东省东莞市耕地环境质量评价指标体系

Table 1 Indexes of farmland environmental quality assessment in Dongguan, Guangdong

目标层 Target layer	一级指标 First grade indexes	二级指标 Second grade indexes	数据来源 Data sources	权重 Weight
耕地环境质量	压力指标(0.27)	人均 GDP	2012 年《东莞统计年鉴》	0.23
		人均耕地面积	2012 年《东莞统计年鉴》	0.19
		种植业收入比例	2012 年《东莞统计年鉴》《广东农村统计年鉴》	0.18
		工业“三废”排放量	2012 年《东莞统计年鉴》《广东统计年鉴》	0.27
		生活污水、垃圾排放量	2012 年《东莞统计年鉴》《广东统计年鉴》	0.13
	状态指标(0.5)	pH	土壤样品分析	0.13
		质地	土壤图(1:50 000)	0.17
		有机质含量	土壤样品分析	0.13
		路网密度	2011 年东莞市土地利用现状图(1:10 000)	0.11
		菜地占耕地比例	2012 年《东莞统计年鉴》、《广东农村统计年鉴》	0.20
	响应指标(0.23)	内梅罗综合污染指数	土壤样品分析	0.26
		农药使用量	2012 年《东莞统计年鉴》、《广东农村统计年鉴》	0.34
		化肥使用量		0.40
		有机肥使用量		0.26

耕地环境质量极差, [0.2, 0.4]耕地环境质量较差, [0.4, 0.6]处于警戒级别, [0.6, 0.8]耕地环境质量较好, [0.8, 1.0]耕地环境质量良好。然后利用 ArcGIS 生成耕地环境质量空间分布图(图 3d)。同时根据计算得到的压力、状态和响应指数,生成各指数空间分布图(图 3a、图 3b、图 3c),由于各评价指数均经标准化处理,因此其数值越大对耕地环境质量越有利。

### 1.2.5 PSR 系统协调度分析

为了衡量耕地环境质量的稳定性,通过协调度模型对压力、状态、响应各子系统的协调程度进行判断<sup>[22-23]</sup>,计算公式如下:

$$CI = \frac{X+Y+Z}{\sqrt{X^2+Y^2+Z^2}}$$

式中:CI 为协调度指数( $0 \leq CI \leq 1.732$ );X、Y、Z 分别

为压力、状态、响应指数。

协调度指数越接近1.732,三者取值越接近,其协调度越高,耕地环境质量也越稳定;协调度指数越接近0,三者取值差异越大,在三者相互作用下其取值会趋向于新的平衡,即耕地环境质量越不稳定。

## 2 结果与分析

### 2.1 压力评价

东莞市耕地环境质量压力较小的区域主要分布在东北部和西部河网平原区,中部丘陵平原过渡带、东南部丘陵区以及西南部沿海区域受到的压力较大,尤其是经济较为发达的东城、南城、虎门和长安等乡镇(图 3a)。从不同压力指标来看,压力指数较大的乡

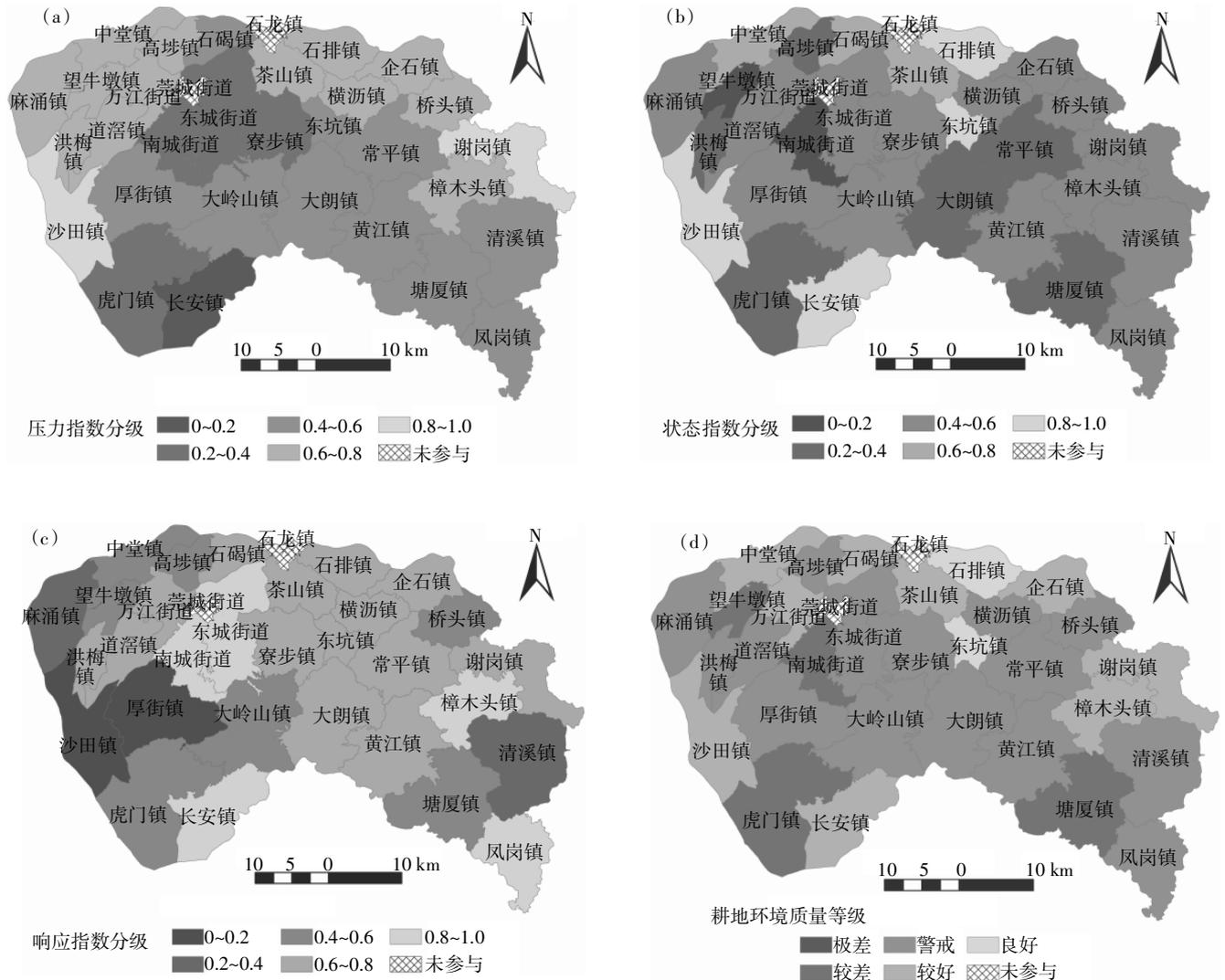


图3 评价指数级别分布图

Figure 3 Spatial distribution of farmland environmental quality grades

镇主要受到人均耕地不足、工业“三废”排放以及生活垃圾的影响,在这些区域一方面要根据用途管制制度严格保护耕地,同时还要对污染企业加强政府环境监管力度,控制生活垃圾产生量并进行无害化处理。

## 2.2 状态评价

东莞市 69.4%的耕地环境质量状态指数大于 0.4 (表 2),只有望牛墩和南城的状态指数小于 0.2(图 3b)。土壤自然理化性状较差,重金属污染严重是导致望牛墩镇耕地环境质量状态较差的主要原因;虽然南城内梅罗综合污染指数较小,但由于土壤质地、有机质含量、路网密度等状态指标较差,导致其状态指数较小。此外,道滘、高埗、虎门、塘厦的内梅罗综合污染指数较大,说明这些区域受到的重金属污染相对较为严重,应加强该区域的土壤重金属污染修复工作。

## 2.3 响应评价

响应指数较低的区域主要分布在西部河网平原区域,东北部除桥头镇外其余乡镇响应指数均较大。从图 3c 可以看出,农业生产条件较好的平原区域其响应指数级别大多较低,而种植业收入比例较低的乡镇,如东城、南城、长安及樟木头等乡镇的响应指数较大。从单项评价指标来看,沙田、厚街、清溪、高埗及虎门的农药施用量较高,麻涌、沙田、厚街及中堂化肥施用量较高,桥头、清溪及大岭山等乡镇的有机肥施用量较高。对于这些区域,一方面要加强农民科学种植培训,引导农民合理施用化肥农药,促进农业规模化、集约化发展;另一方面需要加强政府管制,禁止污水灌溉及施用不合格的垃圾堆肥,降低农业生产外部效应。

## 2.4 综合质量评价

由表 2 可知,东莞市 84.3%的耕地环境质量等级处于警戒级以上水平,其中 56.1%的耕地处于警戒等级,23.8%的耕地处于较好等级,仅有 4.4%的耕地处于良好水平,低于警戒等级的耕地全部处于较差等

级,占耕地总面积的 15.7%,没有耕地处于极差水平。

从空间分布(图 3d)来看,耕地环境质量良好和较好的耕地主要分布在北部河网平原区,该区域作为供水工程水源地,环境受到严格保护<sup>[24]</sup>;此外,沙田、长安、樟木头和谢岗均处于较好等级,环境质量较差的耕地主要零散分布于全市不同区域,包括虎门、南城、望牛墩和塘厦四个乡镇。工业“三废”的大量排放、重金属污染状况严重以及化肥农药的大量使用是造成虎门、望牛墩和塘厦耕地环境质量较差的重要原因;南城耕地环境质量则主要受种植业收入比例、路网密度、菜地占耕地比例以及人均耕地压力较大等因素的影响。中部和东南部的凤岗和清溪等 15 个乡镇耕地质量等级均处于警戒等级,对这些区域要加强耕地环境质量监控和管理,防止耕地环境质量退化。

## 2.5 PSR 协调度分析

各乡镇 PSR 系统的协调度指数见图 4。将协调度指数与耕地环境质量等级图(图 3d)进行比较可以发现,四个耕地环境质量较差的乡镇中,南城和望牛墩的协调度指数较低,是不稳定状态下的低环境质量,应根据影响耕地环境质量的主要因素采取针对性措施加强管控,促进耕地环境质量优化发展;虎门和塘厦的协调度指数较高,是稳定状态下的低环境质量,压力、状态、响应指数为低水平下的协调发展,必须从三个方面同时采取措施才能有效改善其耕地环境质量。此外,长安与沙田两个乡镇虽然耕地环境质量处于较好水平,但其协调度指数较低,是不稳定状态下的高环境质量,应引起管理部门的注意,防止其耕地环境质量恶化。

## 3 讨论

当前,耕地环境质量评价大多采用内梅罗综合污染指数法,仅对耕地的污染状态进行评价,不考虑对其有重大影响的社会经济环境因素。本文从压力、状

表 2 各耕地环境质量等级乡镇数目及面积分布表

Table 2 Number of town and area by farmland environmental quality grades

等级 Grade	乡镇数目 Town number				耕地面积百分比 Area proportion/%			
	压力 Press	状态 State	响应 Response	综合 Comprehensiveness	压力 Press	状态 State	响应 Response	综合 Comprehensiveness
极差 Poor	1	2	2	0	0.7	2.4	15.0	0
较差 Low	4	6	2	4	7.4	28.2	13.6	15.7
警戒 Warning	10	15	7	15	44.6	49.9	30.6	56.1
较好 Good	13	3	14	9	39.7	10.0	33.8	23.8
良好 Superior	2	4	5	2	7.6	9.5	7.0	4.4
合计 Sum	30	30	30	30	100.0	100.0	100.0	100.0

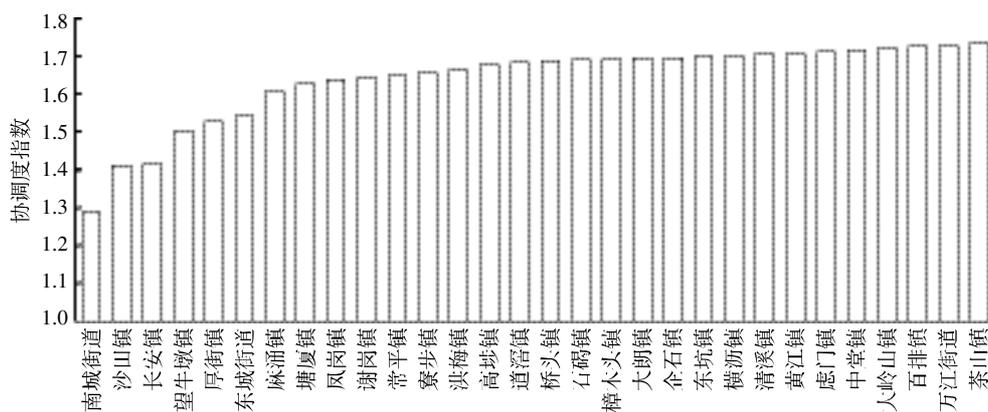


图4 协调度指数

Figure 4 Index of coordination degree

态、响应三个方面对东莞市耕地环境质量进行分析评价,通过构建协调度模型对耕地环境质量的稳定性进行定量分析,评价结果准确反映了不同评价单元间的耕地环境质量差异,对管理者明确重点管理区域并采取针对性管控措施具有重要意义。但本体系依赖于无量纲的分级,无法对耕地环境质量的绝对值提供准确的衡量。这主要是由于耕地环境质量与其社会经济影响因素之间存在着复杂的非线性相关关系,难以获取二者之间的定量化关系。建立耕地土壤重金属污染及其社会经济影响因素数据库、定量化研究各因素对耕地环境质量变化的影响是未来耕地环境质量评价领域的重要研究内容。

#### 4 结论

(1) 东莞市 28.2% 的耕地环境质量处于良好和较好水平,主要分布在北部河网平原区,该区域作为供水工程水源地,环境受到严格保护;56.1% 的耕地处于警戒水平,对这些区域要加强耕地环境质量监控和管理,防止耕地环境质量退化;处于较差水平的耕地占总面积的 15.7%,其主要影响因素为经济发展和工业“三废”排放压力、耕地自然性状及其耕作管理状态、农药化肥过量施用等不合理的农户响应措施;没有耕地处于极差水平。压力、状态、响应指数协调度较低的区域主要有南城、望牛墩、沙田、长安,其耕地环境质量不稳定,该区域是耕地环境质量管理管控的重点。

(2) 基于“压力-状态-响应”框架的耕地环境质量评价指标体系综合考虑了影响耕地环境质量的自然、人为因素以及耕地自身性状,能够对耕地环境质量做出更加客观的评价,其评价结果不仅反映了耕地环境质量现状,还包含了潜在发展趋势及其变化的因

果关系,有助于决策者采取针对性管控措施,实现耕地环境质量的保护。

#### 参考文献:

- [1] Sun C, Bi C J, Chen Z L, et al. Assessment on environmental quality of heavy metals in agricultural soils of Chongming Island, Shanghai City[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(1): 135-147.
- [2] Mohammad B A H, Parvez L, Islam M A, et al. Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173(1-3): 384-392.
- [3] Varol M. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River(Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 195: 355-364.
- [4] 艾东,朱道林,赫晓霞. 土地整理与生态环境建设关系初探[J]. 生态环境, 2007(1): 257-263.  
AI Dong, ZHU Dao-lin, HE Xiao-xia. The Relationship of land consolidation and bio-environmental rehabilitation[J]. *Ecology and Environment*, 2007(1): 257-263.
- [5] Dumanski J, Pieri C. Land quality indicators: Research plan[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, 81(2): 93-102.
- [6] 郭旭东,邱扬,连纲,等. 基于 PSR 框架的土地质量指标体系研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2003, 22(5): 479-489.  
GUO Xu-dong, QIU Yang, LIAN Gang, et al. The progress and prospect of land quality indicators based on "Press-State-Response" framework [J]. *Progress in Geography*, 2003, 22(5): 479-489.
- [7] 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.  
KONG Xiang-bin, LIU Ling-wei, QIN Jing. Arable land evaluation based on the household land use behavior in Daxing District of Beijing [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(8): 856-868.
- [8] 吴鹏举,林贵茂,陈华文. 东莞市不同产业类型城镇周边菜地土壤重金属污染研究[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(2): 161-164.  
WU Peng-ju, LIN Gui-mao, CHEN Hua-wen. Research on heavy metal contamination in vegetable field around towns with different industry types in Dongguan[J]. *Environmental Science and Management*, 2009,

- 34(2):161-164.
- [9] 窦磊, 马瑾, 周永章, 等. 广东东莞地区土壤-蔬菜系统重金属分布与富集特性分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 47(1):98-102.
- DOU Lei, MA Jin, ZHOU Yong-zhang, et al. Distribution and accumulation of heavy metals in soil vegetable system of Dongguan area, Guangdong Province[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2008, 47(1):98-102.
- [10] 马瑾. 珠江三角洲典型区域(东莞市)土壤重金属污染探查研究[D]. 南京:南京农业大学, 2003:29-30.
- MA Jin. Investigation on heavy metal pollution in typical area of Pearl River Delta(Dongguan City)[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University, 2003:29-30.
- [11] Li X Y, Liu L J, Wang Y G, et al. Heavy metal contamination of urban soil in an old industrial city(Shenyang) in Northeast China[J]. *Geoderma*, 2013, 192:50-58.
- [12] Micó C, Recataló L, Peris M, et al. Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(5):863-872.
- [13] Borůvka L, Vacek O, Jehlička J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils[J]. *Geoderma*, 2005, 128(3-4):289-300.
- [14] 刘凤枝. 农业环境监测使用手册[M]. 北京:中国标准出版社, 2001:124-143.
- LIU Feng-zhi. Manual of environmental monitoring for agriculture[M]. Beijing:Standards Press of China, 2001:124-143.
- [15] 颜利, 王金坑, 黄浩. 基于PSR框架模型的东溪流域生态系统健康评价[J]. 资源科学, 2008, 30(1):107-113.
- YAN Li, WANG Jin-keng, HUANG Hao. An assessment of ecosystem health in Dongxi River basin based on PSR framework[J]. *Resources Science*, 2008, 30(1):107-113.
- [16] 郭旭东, 邱扬, 连纲, 等. 基于PSR框架针对土壤侵蚀小流域的土地质量评价[J]. 生态学报, 2004, 24(9):1884-1894.
- GUO Xu-Dong, QIU Yang, LIAN Gang, et al. Land quality indicators based on "Press-State-Response" framework at catchment for soil degradation by water erosion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9):1884-1894.
- [17] 张凤荣, 安萍莉, 王军艳, 等. 耕地分等中的土壤质量指标体系与分等方法[J]. 资源科学, 2002, 24(2):71-75.
- ZHANG Feng-rong, AN Ping-li, WANG Jun-yan, et al. Soil quality criteria and methodologies of farmland grading[J]. *Resources Science*, 2002, 24(2):71-75.
- [18] 宋马林, 王舒鸿. 环境库兹涅茨曲线的中国“拐点”:基于分省数据的实证分析[J]. 管理世界, 2011(10):168-169.
- SONG Ma-lin, WANG Shu-hong. Environmental Kuznets curve China "inflection point": An empirical analysis based on provincial data[J]. *Management World*, 2011(10):168-169.
- [19] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等. 东莞市农田土壤和蔬菜重金属的含量特征分析[J]. 地理学报, 2008, 63(9):994-1003.
- CAI Li-mei, MA Jin, ZHOU Yong-zhang, et al. Heavy metal concentrations of agricultural soils and vegetables from Dongguan, Guangdong Province, China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(9):994-1003.
- [20] 路婕, 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.
- LU Jie, LI Ling, WU Ke-ning, et al. Cultivated land comprehensive quality evaluation based on agricultural land classification and soil environmental quality evaluation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(2):323-329.
- [21] 王丽, 黄元仿, 庞圣杰. 基于PSR框架的农用地质量指标体系的构建与应用[J]. 土壤通报, 2009, 40(5):981-986.
- WANG Li, HUANG Yuan-fang, PANG Sheng-jie. The design and application of farmland quality indicator system based on PSR framework[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(5):981-986.
- [22] 朱一中, 曹裕. 基于PSR模型的广东省城市土地集约利用空间差异分析[J]. 经济地理, 2011, 31(8):1375-1380.
- ZHU Yi-zhong, CAO Yu. Assessment of urban land intensive use based on PSR model: A case study of Guangdong Province[J]. *Economic Geography*, 2011, 31(8):1375-1380.
- [23] 高珊, 黄贤金. 基于PSR框架的1953—2008年中国生态建设成效评价[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2):341-350.
- GAO Shan, HUANG Xian-jin. Performance evaluation of eco-construction based on PSR model in China from 1953 to 2008[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(2):341-350.
- [24] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等. 东莞市农业土壤重金属的空间分布特征及来源解析[J]. 环境科学, 2008, 29(12):3496-3502.
- CAI Li-mei, MA Jin, ZHOU Yong-zhang, et al. Multivariate geostatistics and GIS-based approach to study the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in the Pearl River Delta, China[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(12):3496-3502.