

# 基于重金属和有益微量元素评价南方典型丘陵区稻田土壤健康质量——以奉新县为例<sup>①</sup>

余慧敏, 李 婕, 韩 逸, 郭 熙\*

(江西农业大学鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室/国土资源与环境学院, 南昌 330045)

**摘要:** 在已有相关研究的基础上, 从影响耕地土壤健康的有益与不利因素两方面构建评价指标体系; 运用内梅罗综合污染指数法对灌溉水环境质量、土壤重金属两个指标进行评价; 采用最小因子法对有益微量元素进行评价; 综合单一指标评价结果运用累加法进行了研究区稻田土壤健康评价。研究结果表明: ①奉新县稻田灌溉水环境质量总体良好, 95.59% 的灌溉水水质清洁; 全县 99.31% 的稻田土壤重金属级别为 1 级, 稻田土壤重金属污染很少; 全县稻田有益微量元素分值处于中等偏低水平, 73.40% 为 0.2~0.4 分, 主要分布在东部平原区、西部山区的各乡镇。②全县稻田土壤总体健康状况较好, 以 2 级健康居多, 占比 74.67%, 健康级别在空间上呈现出中部高、东部与西部低的分布格局。

**关键词:** 土壤健康评价; 内梅罗综合污染指数法; 最小因子法; 稻田

中图分类号: F323.21 文献标志码: A

## Evaluation of Soil Health Quality in Typical Hilly Areas of Southern China Based on Heavy Metals and Beneficial Trace Elements: A Case Studies in Fengxin County

YU Huimin, LI Jie, HAN Yi, GUO Xi\*

(Key Laboratory of Poyang Lake Watershed Agricultural Resources and Ecology of Jiangxi Province/Academy of Land Resource and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

**Abstract:** Based on the existing relevant studies, this paper established an evaluation index system from both beneficial and unfavorable factors affecting the health of cultivated land soil in Fengxin County. Nemerow comprehensive pollution index was used to evaluate the environmental quality of the irrigation water and soil heavy metals, minimum factor method was used to evaluate the beneficial trace elements, comprehensive evaluation of paddy soil health was carried out by using the equal weight accumulation method combined with the results of three single indicators. The results showed that: 1) the quality of irrigation water was generally good, 95.59% of irrigation water was clean. 99.31% of paddy soil were in graded 1 of health metal levels, means heavy metal pollution seldom existed. The value of beneficial trace elements was in the levels of moderate-lower, with 73.40% of paddy soil was ranged between 0.2 to 0.4 in score, and mainly distributed in east plain and townships in west mountainous areas. 2) The overall health status of paddy soil in Fengxin County is good, 74.67% was in grade 2, and health level is higher in the middle and lower in the east and west.

**Key words:** Soil health evaluation; Nemerow comprehensive pollution index; Minimum factor method; Paddy field

我国耕地资源匮乏、整体质量不高<sup>[1]</sup>, 因长期过度施用化肥、农药造成的土壤污染等问题致使耕地不健康<sup>[2]</sup>。耕地健康的核心在于土壤健康, 土壤是农作物生产之根本, 耕地土壤健康关系到粮食安全问题, 对国民经济发展、社会稳定和国家自立的全局性重大

战略具有重要意义<sup>[3]</sup>。国际热点研究显示, 土壤健康管理有可能是新一轮农业革命的核心<sup>[4]</sup>。联合国粮农组织将土壤健康定义为: 土壤作为一个生命系统具有的维持其功能的能力, 健康的土壤能维持土壤生物群落多样性、抵抗病虫害的传播、促进基本的植物养

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0301603)资助。

\* 通讯作者(xig435@163.com)

作者简介: 余慧敏(1995—), 女, 江西都昌人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤遥感与信息。E-mail: huimin0929@163.com

分循环、改善土壤结构、提高作物产量, 以及改善环境<sup>[5]</sup>。曹志洪<sup>[6]</sup>认为土壤健康质量是土壤净化容纳污染物质、维护和保障人类及动植物健康能力的量度。因此, 耕地土壤健康是指在自然或管理的生态系统边界内, 土壤净化容纳污染物质, 维持水、气质量以及促进人类和动植物健康的能力。当前我国耕地基础地力对粮食生产的贡献仅为 50% 左右<sup>[3]</sup>, 在此形势背景下, 开展耕地土壤健康评价, 研究耕地土壤健康特征, 为构建耕地健康、实现耕地数量-质量-生态三位一体保护的目标提供参考。

“健康”概念最初应用于医学领域, 随着社会与科学的发展而后逐渐被用于其他各领域。在 20 世纪 40 年代 Leopold<sup>[7]</sup>首先提出了土地健康概念, 1943 年新西兰在土壤与健康期刊提出了“健康土壤-健康食品-健康人群”的理念<sup>[8]</sup>。随后国内外不同学者逐渐开展与土壤健康相关研究。20 世纪 80 年代中期, 加拿大农业部开展“土壤健康”研究项目<sup>[9]</sup>。澳大利亚学者 Pankhurst 等<sup>[10]</sup>认为土壤健康指土壤具有连续的生物生产力、促进动植物健康水平以及维持环境质量。国内单美<sup>[11]</sup>、李强<sup>[12]</sup>、杨希越等<sup>[13]</sup>从耕地质量、产能与土壤环境相结合的角度对耕地健康进行评价。谭晶今<sup>[14]</sup>选取了自然环境、社会环境以及经济环境 3 个方面的指标进行了研究区耕地健康评价。上述学者从不同角度构建了不同的健康评价的指标体系, 评价指标中均采用了土壤重金属指标, 但并未涉及有益微量元素指标。目前, 基于生态环境视角的耕地评价研究较少<sup>[11]</sup>, 本研究从耕地土壤环境的角度选取评价指标体系。耕地土壤环境指标包括了土壤重金属含量、有益微量元素含量、灌溉水污染等, 耕地土壤中重金属、灌溉水污染物等含量越高, 耕地土壤环境受到污染越严重, 耕地土壤健康状况越差, 反之耕地土壤越健康; 此外, 在一定范围内, 耕地土壤中有益微量元素含量越高, 耕地土壤越健康<sup>[11]</sup>。本文在结合已有研究的基础上, 从正反两面考虑耕地土壤健康的影响因素, 进行稻田土壤健康评价, 探索较为合理的耕地土壤健康评价模式, 为耕地土壤的保护与提升提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

奉新县位于江西省西北部, 距省会南昌 65 km, 地处  $114^{\circ}44' \sim 115^{\circ}33'E$ 、 $28^{\circ}34' \sim 28^{\circ}52'N$  之间, 为东西长、南北窄的长条形地域。该区属中亚热带气候, 四季分明, 降雨充沛, 地形以丘陵山地为主, 自西北向东南逐渐倾斜, 形成西高东低的地势, 大小丘陵岗

地分布其间。2015 年全县土地总面积为  $160\ 306.86\text{hm}^2$ , 其中耕地为  $39\ 355.38\text{ hm}^2$ , 占全县总面积的 24.55%。

### 1.2 数据采集与检测方法

本研究的稻田地块数据来源于奉新县 2015 年耕地质量等别更新数据, 从中提取奉新县稻田图斑作为评价单元, 共计 16 819 个, 面积共计  $33\ 665.20\text{ hm}^2$ 。灌溉水环境质量数据来源于土地质量地球化学评价数据、奉新县灌溉规划, 选取 GB 5084 数据来源于《农田灌溉水质标准》作为评价的标准值。土壤重金属数据来源于 74 个土壤实际采样数据样点, 参照《土壤环境质量标准》作为污染评价标准值。有益微量元素基于 179 个土壤采样点, 其中有效钼数据来自奉新县测土配方施肥数据。奉新县水稻土主要包括潴育型、潜育型、淹育型 3 个亚类, 潜育型主要为麻沙泥田、潮沙泥田、红泥田、红砂泥田、黄泥田, 潜育型、淹育型以麻沙泥田等为主。样点采集过程中充分考虑了土壤类型的分布, 各土属的样点数比例与其面积比例一致, 并考虑样点在空间内均匀分布的原则, 各乡镇内均有代表样点。随后对样点进行普通克里格插值, 土壤重金属 60 个样点进行插值, 14 个样点进行验证, 检验精度  $R^2$  为  $0.45 \sim 0.58$ , 标准化均方根为  $0.72 \sim 0.86$ ; 有益微量元素 150 个样点进行插值, 29 个样点进行验证, 检验精度  $R^2$  为  $0.55 \sim 0.62$ , 标准化均方根为  $0.65 \sim 0.78$ 。克里格方法(Kriging)能够根据已知样点的属性和空间位置关系对没有采样点的局部区域进行无偏最优估值<sup>[15]</sup>, 既考虑了土壤样点间的空间结构关系, 又加入了本身属性作为参考<sup>[16]</sup>, 在保证预测精度的同时也节约了采样成本。有益微量元素、有效钼与土壤重金属采样点分布见图 1。

土壤样品在室温下自然风干, 磨碎, 过 100 目尼龙筛, 取适量样品进行测定。土壤重金属含量参照 HJ/T 166-2004《土壤环境监测技术规范》<sup>[17]</sup>测定, 土壤 As、Hg 采用 PERSEE 原子荧光光度计(PF-7 型)测定; Cd、Pb 和 Cr 采用火焰原子吸收光谱仪(Agilent 200AA 型)测定。有益微量元素测定参照《土壤农业化学分析方法》<sup>[18]</sup>, 土壤有效 Zn、Cu、Mn、Fe、Mo 采用 DTPA 浸提-原子吸收分光光度法测定, 土壤有效 B 采用沸水浸提-姜黄素比色法测定。灌溉水环境质量测定: pH 采用玻璃电极法(GB/T 6920), 六价铬采用二苯碳酰二肼分光光度法(GB/T 7467), 总 Hg 采用冷原子吸收分光光度法(GB/T 7468), 总 As 采用二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法(GB/T 7485)。

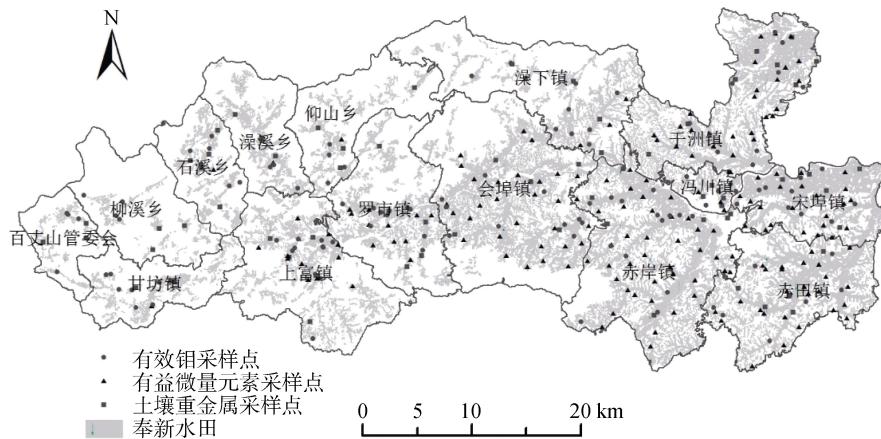


图 1 奉新县稻田采样点分布图  
Fig.1 Sampling sites of paddy fields in Fenxin County

### 1.3 稻田土壤健康综合评价方法

**1.3.1 指标体系的构建** 伴随工业化的发展引起的土壤重金属污染问题日益突出<sup>[19]</sup>, 一旦其在土壤中的含量超过限定标准, 并通过植物的富集作用与食物链的传播, 将对人体造成严重的危害<sup>[20]</sup>, 土壤重金属指标的选取也是耕地土壤健康评价区别于传统耕地质量、耕地地力评价的一个重要方面。土壤重金属中主要对环境有危害的“五毒”元素为 Hg、Cd、

Pb、Cr 和类金属 As, 其中以 Hg 毒性最大, 其次为 Cd、Pb、Cr、As<sup>[21]</sup>。灌溉水环境质量对于无公害健康农产品的种植生产基地也很重要<sup>[22]</sup>。此外, 有益微量元素的滋养能使作物产品品质更加绿色、有机、无公害<sup>[11]</sup>。

根据奉新县实际情况, 本研究稻田土壤健康评价从灌溉水环境质量、土壤重金属与有益微量元素 3 个方面构建评价指标体系(表 1)。

表 1 研究区稻田土壤健康评价指标体系

Table 1 Index system of health evaluation of paddy soil in study area

目标层	指标层	指标内涵	因子层
健康状况	灌溉水环境质量	反映灌溉水质量是否能够达到灌溉水质要求, 尤其在污灌区和土壤环境容量较低的地区, 灌溉水是影响土壤环境质量和农产品安全性的主要因素	水质 pH、水质化学需氧量、水质总 Hg、水质总 As、水质总 Cr、水质氟化物。
	土壤重金属	由于人类活动或地质高背景造成土壤中含量异常, 含量过高或生物活性增加会对农作物、地表水、地下水与大气环境产生危害。	As、Cd、Cr、Hg、Pb
	有益微量元素	对人体健康有益的而摄入量较小的元素。	有效 Fe、有效 B、有效 Cu、有效 Zn、有效 Mn、有效 Mo

**1.3.2 稻田土壤健康综合评价方法** 基于地力水平与健康状况关系的分析, 在一定的浓度范围内, 土壤健康状况的改变并不会对作物产量有影响, 但是会降低或者提高作物品质。因此, 稻田土壤健康状况系数的确定采用“健康状况系数的累加模式”, 即以未受到污染和未含有有益微量元素的耕地为基准累加, 依据灌溉水环境、土壤重金属、有益微量元素的对应分级标准进行加和。

将稻田土壤健康系数依据一定的分级标准进行健康等级划分, 分级标准见表 2。

### 1.4 单一指标评价方法

**1.4.1 内梅罗综合污染指数法** 内梅罗综合污染

表 2 稻田土壤健康系数分级标准

Table 2 Classification standard of health coefficient of paddy soil

指标	分级	分值	描述
健康系数	1 级	>1.4	非常健康
	2 级	1.0 ~ 1.4	健康
	3 级	<1.0	不健康

指数法在多因子加权过程中能够兼顾极值, 全面反映不同污染物的污染水平, 突出主要污染物对环境质量造成危害<sup>[23-24]</sup>。本研究中灌溉水环境质量、土壤重金属两个指标值均采取该方法计算。计算公式如下:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{[(\bar{P}_i)^2 + (P_{i,\text{max}})^2]/2} \quad (1)$$

$$P_i = C_i / S_i \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{综}}$  为内梅罗综合污染指数,  $\bar{P}_i$  为各项污染物的污染指数平均值,  $P_{i,\text{max}}$  为各污染物的污染指数最大值,  $P_i$  为污染物  $i$  的污染指数,  $C_i$  为污染物  $i$  的实测含量,  $S_i$  为污染物评价标准值。得出的综合指数依据分级标准进行分级、赋分, 灌溉水环境质量、土壤重金属分级标准见表 3、表 4。

表 3 灌溉水环境质量分级标准

Table 3 Classification standard of environmental quality of irrigated water

指标	描述	分级	赋分
灌溉水环境质量	清洁: 水质综合污染指数 $\leq 0.5$	1 级	0
	尚清洁: 水质综合污染指数 $0.5 \sim 1.0$	2 级	-0.1
	污染: 水质综合污染指数 $\geq 1.0$	3 级	-0.2

表 4 土壤重金属分级标准

Table 4 Classification standard of soil heavy metals

指标	描述	分级	赋分
土壤重金属	无污染: 综合污染指数 $P \leq 0.7$	1 级	0
	轻微污染: 综合污染指数 $0.7 < P \leq 1.0$	2 级	-0.1
	轻度污染: 综合污染指数 $1.0 < P \leq 2.0$	3 级	-0.2
	中度污染: 综合污染指数 $2.0 < P \leq 3.0$	4 级	-0.3
	重度污染: 综合污染指数 $P > 3.0$	5 级	-0.4

**1.4.2 最小因子法** 最小因子法运用木桶原理, 将木桶的最大容量作为土壤有益微量元素的得分高低, 最低分数的因子限制着土壤的最终得分, 采取最小值定律, 选取所有分值中的最小值作为评价单元的土壤有益微量元素的最终得分<sup>[25-26]</sup>。有益微

量元素分值依据峰型隶属度函数进行计算, 计算公式如下:

$$y_i = \begin{cases} 0 & u_i \ll u_{t1} \text{ 或 } u_i \geq u_{t2} \\ 1/(1+a_i(u_i - c_i)^2) & u_{t1} < u_i < u_{t2} \\ 1 & u_i = C_i \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $y_i$  为评价因子的隶属度,  $u_i$  为评价因子的值,  $a_i$  为常数,  $u_{t1}$ 、 $u_{t2}$  分别为指标上、下限值。

有益微量元素隶属度值见表 5。

表 5 有益微量元素隶属度

Table 5 Classification standard of beneficial trace elements

有益微量元素	含量(mg/kg)						
	有效 Fe	20	16	10	4.5	2.5	1.2
有效 B	2	1.5	1	0.5	0.2	0.1	0.11
有效 Cu	1.8	1.4	1	0.2	0.1	0.04	
有效 Zn	3	2.1	1	0.5	0.3	0.16	
有效 Mn	30	23	15	5	1	0.7	
有效 Mo	0.3	0.24	0.2	0.15	0.1	0.06	
隶属度	1	0.89	0.8	0.6	0.4	0.23	

## 2 结果与分析

### 2.1 单一指标评价结果

**2.1.1 灌溉水环境质量** 依据 GB5084—2005 《农田灌溉水质标准》, 将水稻作物农田灌溉用水水质标准作为基础值, 进行内梅罗综合污染指数计算, 结合奉新县灌溉分区图, 运用 Arc GIS 软件制作出灌溉水环境质量级别图(图 2)。

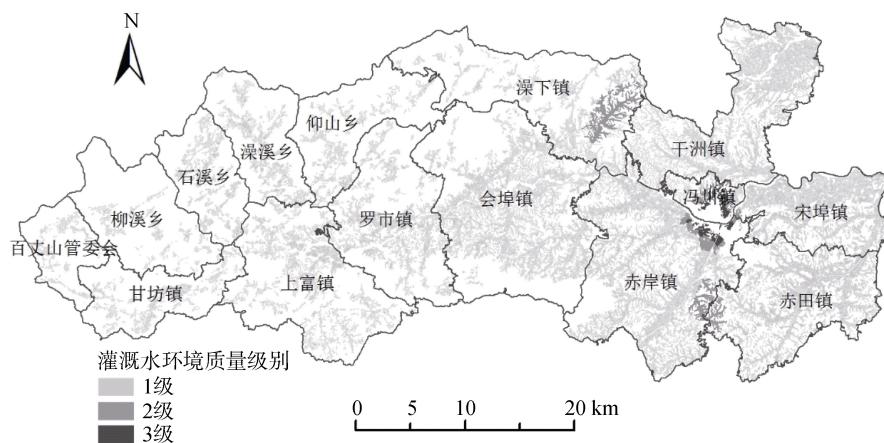


图 2 奉新县稻田土壤健康评价灌溉水环境质量级别图

Fig.2 Grade map of irrigation water environmental quality

奉新县灌溉水环境质量总体良好, 95.59% 稻田灌溉水环境质量为 1 级, 水质清洁; 3.56% 为 2 级, 水质尚清洁, 分布在澡下镇、赤岸镇、赤田镇、冯川镇等; 0.85% 为 3 级, 水质受到一定污染, 分布在

冯川镇、赤岸镇等。

流域内土地利用情况与社会经济发展状况对该流域的水质会产生重要的影响<sup>[27-28]</sup>。此外, 汽车尾气的排放也会引起一定的污染。奉新县县城地处冯川

镇, 县城经济发展更快, 工业化程度相对偏远乡镇较高, 汽车车流量也相对较高, 工业化产生的废弃物与汽车尾气通过干湿沉降, 最终经河流灌溉流入农田, 对县城及周边稻田耕地灌溉水质产生一定的不良影响。

表 6 土壤重金属探索性分析统计表  
Table 6 Statistics of soil heavy metals

重金属元素	样本数	最小值(mg/kg)	最大值(mg/kg)	平均值(mg/kg)	峰度	偏态	标准差(mg/kg)
Cr	74	25.70	102.00	60.41	2.64	0.31	16.95
Pb	74	23.00	60.60	35.79	4.15	0.68	6.85
Cd	74	0.07	0.49	0.20	7.09	1.23	0.07
As	74	3.10	80.54	9.24	32.74	5.27	10.72
Hg	74	0.06	0.69	0.20	9.78	2.28	0.12

根据统计结果, 可以发现, Cr 元素含量峰度小于 3, 表明其数据分布与正态分布相比较为平坦, 含量分布相对均匀; Pb、Cd、As、Hg 4 种元素含量峰度均大于 3, 表明其数据分布相对集中, 较正态分布而言较为陡峭。Cr、Pb、Cd、As 和 Hg 5 种元素的偏态均大于 0, 说明其数据均向右偏态分布, 表明比平均值小的重金属含量数据相对较多。

对 74 个样点利用 ArcGIS 软件进行普通克里格插值计算, 将属性赋到研究区所有评价单元上, 随后运用内梅罗综合污染指数法进行计算, 根据土壤重金属分级标准, 运用 ArcGIS 软件制作出奉新县 5 种土壤重金属含量分布图与土壤重金属级别图(图 3、图 4)。

奉新县 99.31% 稻田土壤重金属级别为 1 级, 只有 0.69% 为 2 级分布在西部的石溪乡等, 该评价结果表明, 奉新县稻田土壤重金属污染很少, 大部分稻田没有受到重金属污染。

**2.1.3 有益微量元素** 对有益微量元素采样结果进行探索性分析, 得出 6 种元素各统计值见表 7。

上述统计结果表明, 有效 Mn、有效 Mo 的峰度均小于 3, 其数据分布较为均匀, 与正态分布相比较为平缓; 有效 Fe、有效 Cu、有效 B、有效 Zn 的峰度均大于 3, 其数据分布相对集中, 较正态分布而言更陡峭。有效 Fe 偏态小于 0, 其数据向左偏态分布, 表明比平均值大的含量值数目相对较多。有效 Zn、有效 B、有效 Cu、有效 Mn、有效 Mo 偏态均大于 0, 其数据向右偏态分布, 表明比平均值小的含量值数目相对较多, 其中有效 Mn、有效 Mo 向右偏态较小, 有效 B、有效 Cu 向右偏态较大, 有效 Zn 向右偏态最大。

利用 ArcGIS 软件对样点进行普通克里格插值, 并将其插值结果赋到研究区所有评价单元上, 得出奉新县各评价单元的土壤养分元素含量情况, 根据隶属度函数求取各评价单元有益微量元素分值, 之后运用

响, 降低了灌溉水环境质量。

**2.1.2 土壤重金属** 对土壤重金属样点数据进行探索性分析, 得出 5 种土壤重金属元素各统计值(表 6)。

最小因子法, 选取隶属度最小值作为评价单元土壤有益微量元素最终得分, 利用 ArcGIS 软件制作出奉新县 6 种有益微量元素含量分布图、稻田土壤健康评价有益微量元素分值图(图 5、图 6)。

由图 5 可以看出, 奉新县稻田有益微量元素含量中等较高, 而有效 Mo 含量偏低, 由于该单一指标评价采用最小因子法, 评价结果受有效 Mo 含量影响较大, 从而有益微量元素级别处于中等偏下。图 6 表明, 有益微量元素分值以 0.2~0.4 分居多, 占 73.40%, 主要分布在东部山区、西部平原区的一些乡镇; 其次是 0.4~0.6 分, 为 25.81%, 主要分布在中部的干州镇、冯川镇、赤岸镇等; 仅 0.79% 为 0~0.2 分。

## 2.2 稻田土壤健康综合评价结果

将单一指标评价分值结果采用耕地健康综合评价累加法进行计算, 得出奉新县稻田土壤健康评价各评价单元健康系数范围为 1~1.6, 根据健康系数分级标准, 计算得出各评价单元的稻田土壤健康级别, 并统计出各级别下的稻田图斑面积、数量及比例分布状况(表 8)。

上述统计结果表明, 全县非常健康的稻田共计 4 475 个评价单元, 面积为 8 527.71 hm<sup>2</sup>, 占稻田总面积的 25.33%; 健康稻田评价单元为 12 344 个, 面积为 25 137.49 hm<sup>2</sup>, 占比 74.67%。

运用 ArcGIS 生成级别图, 得出奉新县稻田土壤健康评价级别图(图 7)。

奉新县稻田土壤总体健康状况较好, 健康级别在空间上呈现出中部高、东西部低的分布格局。1 级主要分布在中部的干州镇、冯川镇、会埠镇、赤岸镇, 少数散落在其他乡镇; 2 级则分布在除中部以外的东部、西部的各个乡镇。

根据单一指标评价结果, 奉新县稻田灌溉水环境质量只有中部的少数部分级别较低; 中部地区的土壤

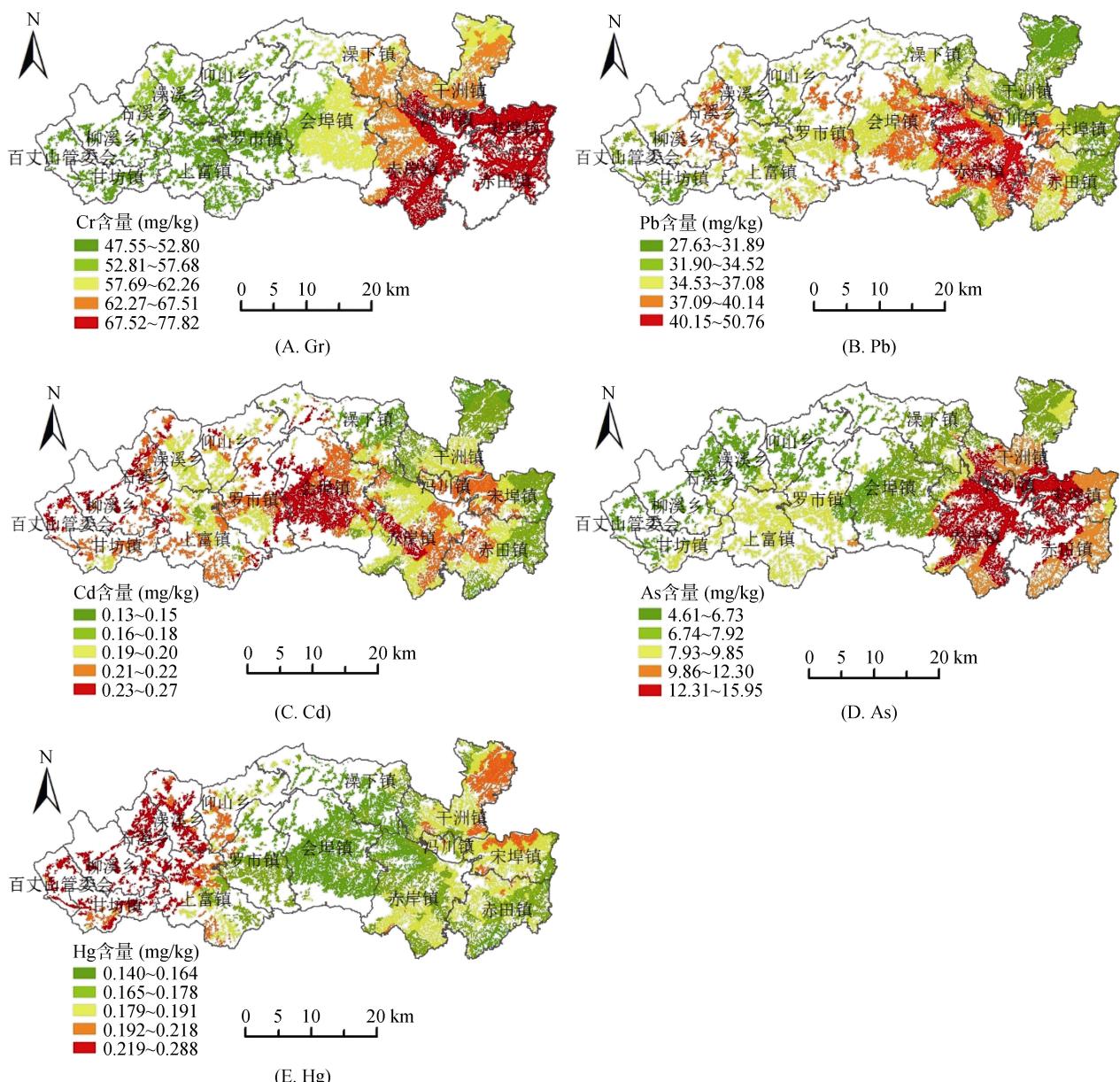


图3 奉新县稻田土壤重金属含量分布图  
Fig.3 Map of heavy metal contents in paddy soil

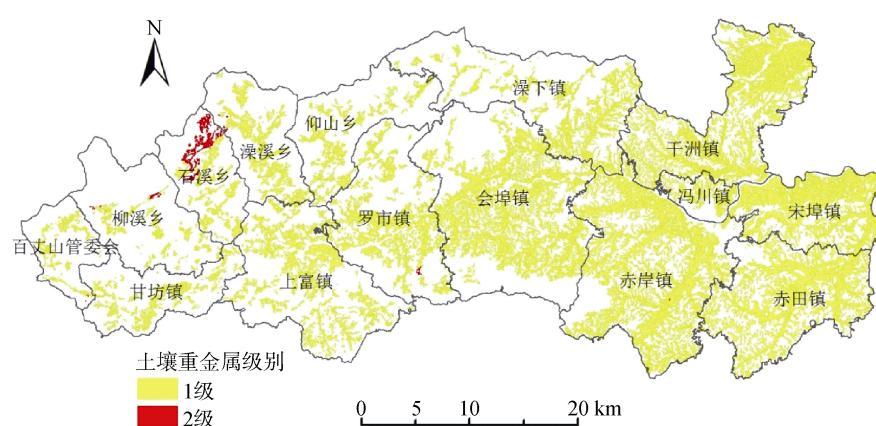


图4 奉新县稻田土壤健康评价土壤重金属级别图  
Fig.4 Grade map of soil heavy metals of paddy soil

表 7 有益微量元素探索性分析统计表  
Table 7 Statistics of beneficial trace elements

有益微量元素	样本数	最小值(mg/kg)	最大值(mg/kg)	平均值(mg/kg)	峰度	偏态	标准差(mg/kg)
有效 Zn	179	0.01	4.44	0.70	20.86	3.77	0.60
有效 B	179	0.01	2.54	0.72	5.38	1.51	0.51
有效 Cu	179	0.92	5.09	2.47	5.07	1.04	0.60
有效 Fe	179	25.60	271.70	188.73	4.12	-0.86	48.86
有效 Mn	179	10.20	60.00	26.92	2.78	0.59	10.14
有效 Mo	121	0.04	0.26	0.15	2.45	0.11	0.05

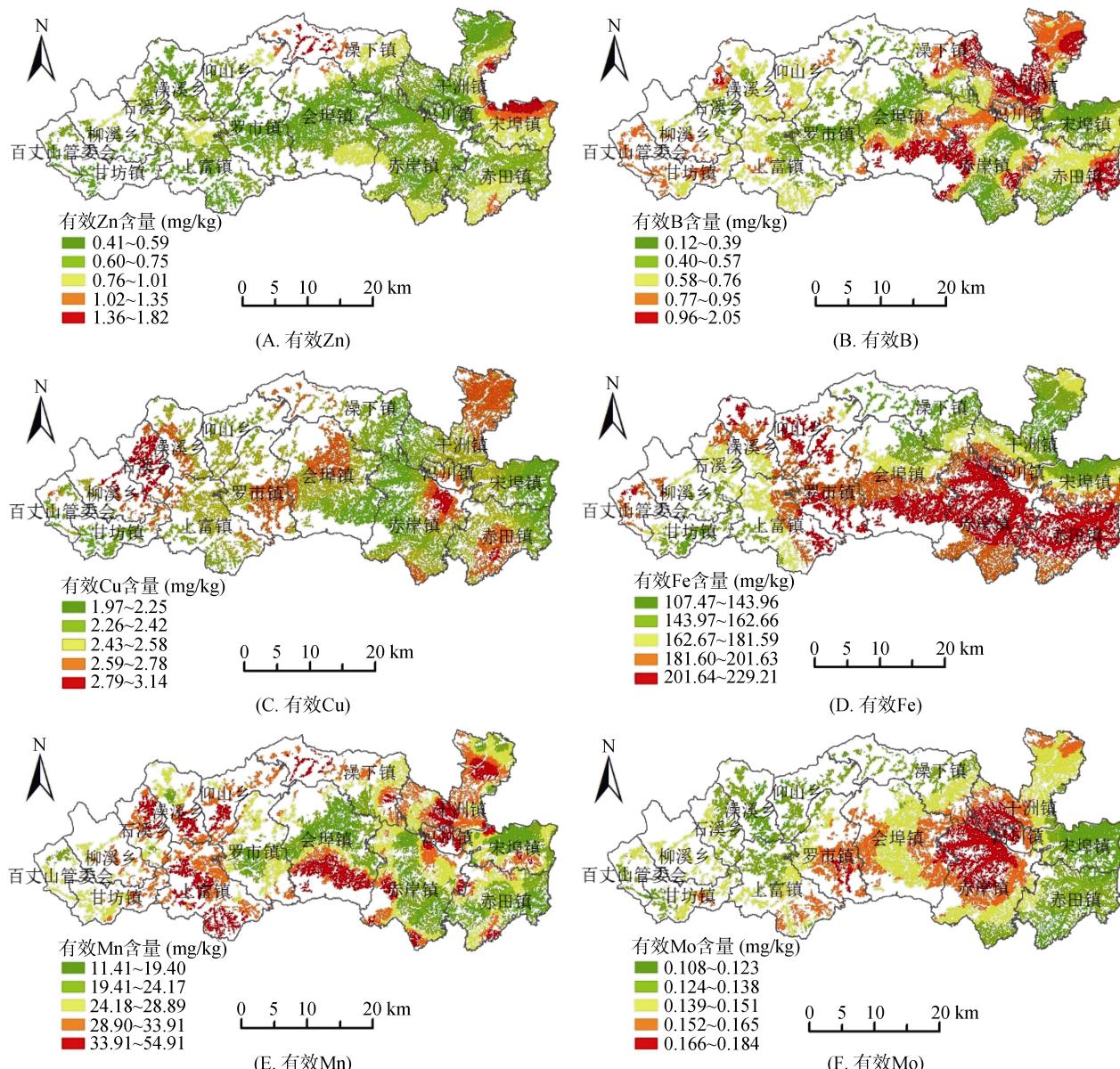


图 5 奉新县稻田有益微量元素含量分布图  
Fig.5 Beneficial trace element contents in paddy soil

重金属级别与东部平原区、大多数西部山区处在同一级别；而中部的有益微量元素级别最高。综合上述评价结果，奉新县中部稻田土壤健康级别最高，耕地土壤健康状况最好。

### 3 讨论

土壤重金属的来源包括成土母质、工业、农业、交通、大气沉降等<sup>[29-33]</sup>。阿吉吉丽·马木提等<sup>[34]</sup>研究

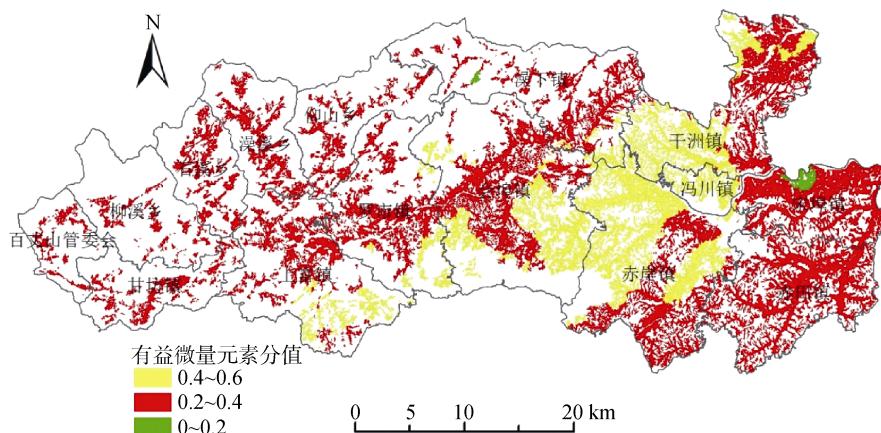


图 6 奉新县稻田土壤健康评价有益微量元素分值图

Fig.6 Grade map of beneficial trace elements of paddy soil

表 8 奉新县稻田土壤健康级别面积、数量、比例分布表  
Table 8 Area, quantity and proportion of health grade of paddy soil

级别	评价单元数	面积( $hm^2$ )	占稻田总面积比例(%)
1 级	4 475	8 527.71	25.33
2 级	12 344	25 137.49	74.67
总计	16 819	33 665.20	100.00

表明,耕地土壤中 As、Cd、Pb 的来源主要受人类活动的影响。农业上施肥对土壤中重金属累积量产生直

接影响<sup>[35~36]</sup>,陈芳等<sup>[37]</sup>通过长期定位试验表明,施用磷肥是导致研究区土壤重金属含量增加的主要原因。工业、生活污水进行农业灌溉也会导致重金属在土壤中积累,从而引发土壤重金属污染问题<sup>[38]</sup>,影响耕地土壤健康。而根据调查统计资料,奉新县土壤自然本底较好,重金属元素含量较少;此外,县域内工业化程度不高,污染型工业较少;再者,该县注重生态农业,肥料的施用多选择不含重金属的肥料。因而奉新县稻田土壤重金属污染很少。

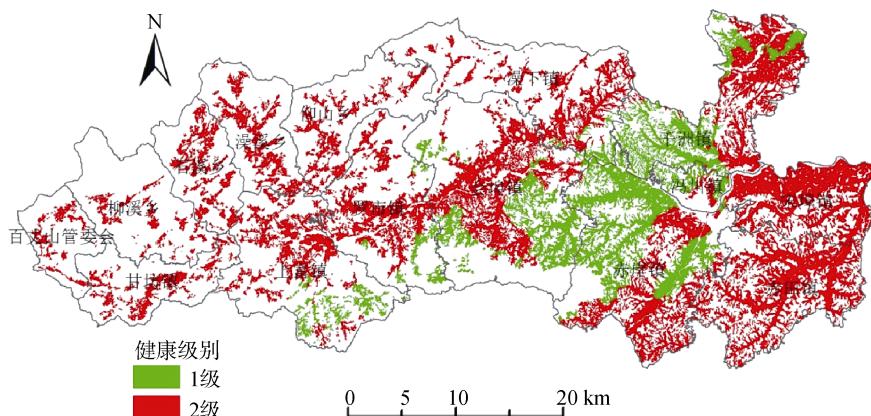


图 7 奉新县稻田土壤健康评价级别图

Fig.7 Grade map of health evaluation of paddy soil

土壤养分的分布受气候、母质、地形、土壤类型等结构性因素与人为因素的影响<sup>[39]</sup>。张毅等<sup>[40]</sup>研究表明耕地土壤中有效 Mo 含量受到母质、海拔、地形、土壤类型的影响。江叶枫等<sup>[41]</sup>的研究表明高程、坡度、地貌类型、土壤类型和常年耕作制度等显著影响着有效 Fe、B、Cu、Zn、Mn 5 种微量元素含量的空间变异。不同类型的土壤,其发育程度不同,导致微量元素的起始含量不同,因而对微量元素产生着影响<sup>[42]</sup>。地形因素如高程主要通过影响水热条件的再分

配过程影响土壤微量元素的空间分布<sup>[43]</sup>。但在气候条件一致的区域内,生态系统经过长期自身演替,人类活动对土壤性质的影响不断增强<sup>[44]</sup>。臧振峰等<sup>[45]</sup>研究表明耕作、施肥以及灌溉等人为活动影响着土壤有益微量元素的空间分布。奉新县地势西高东低,由西部的山区到中部的丘陵地带再到东部的平原区,地形逐渐平缓,坡度下降。中东部低丘山地的复杂地形、气候、降雨、母质以及人类施肥行为等因素的综合作用,可能导致有益微量元素在该区的积累,使得中东

部有益微量元素级别相对较高。

本研究选取了土壤重金属作为稻田土壤健康评价的指标因素之一, 单美<sup>[11]</sup>、谭晶今<sup>[14]</sup>将土壤重金属指标作为耕地健康评价的重要因素, 土壤重金属指标还被应用到与耕地土壤健康评价相关的农用地健康评价<sup>[46-47]</sup>、农田生态系统健康评价<sup>[48]</sup>、土地健康评价<sup>[49]</sup>等研究中。灌溉水环境质量是本文的又一评价指标, 灌溉水环境质量对耕地土壤产生的影响<sup>[50-52]</sup>不可忽视, 将灌溉水环境质量作为评价因素, 丰富了评价指标体系。本文也将有益微量元素纳入到稻田土壤健康评价指标体系中, 有益微量元素对作物生长发育有着重要影响<sup>[53]</sup>, 现有健康评价中鲜有涉及到有益微量元素, 本文将其作为评价的指标因素之一, 综合考虑了稻田土壤健康的有益与不利影响因素, 从正反两面进行稻田土壤健康评价, 具有一定的合理性与科学性。

本文将稻田地块作为评价单元进行小尺度领域的稻田土壤健康评价研究。评价单元小的评价精度相对越高<sup>[11]</sup>, 因而本研究相对于大尺度领域的评价而言, 评价结果具有更高的精度。采用内梅罗综合污染指数法对灌溉水环境质量、土壤重金属进行评价, 该方法是当前国内外计算综合污染指数最常用的方法之一, 能够较全面地反映各种污染物对区域环境质量的协同作用, 从而较准确地评价各类环境要素的污染程度<sup>[54]</sup>, 其计算过程简洁、易于操作<sup>[55]</sup>, 被广泛用于水质污染<sup>[56-58]</sup>、土壤重金属污染<sup>[59-62]</sup>等环境质量评价中。采用最小因子法对有益微量元素进行评价, 常规的耕地评价多采用的是多因素综合评价法, 该方法易于掩盖极值对评价结果的影响, 降低了结果的精确性。与该方法相比, 最小因子法易于操作, 同时避免了最大值对评价结果的影响, 且符合本研究的保守评价目的。最后运用累加法得出了稻田土壤健康综合评价结果, 充分考虑稻田土壤健康的不利与有利因素, 使得评价结果具有一定的全面性与合理性。同时, 该方法简单、容易操作, 便于实际工作中推广应用。

## 4 结论

1) 本研究单一指标评价结果表明, 中部以冯川镇为主的 0.85% 的稻田灌溉水环境质量为最低 3 级, 向外扩展等级逐渐升高, 水质逐渐变好。冯川镇为该县县城所在地, 县城较其他各乡镇而言社会工业化发展最快、人口密度最集中, 人类行为导致灌溉水质受到一定污染, 因而最靠近县城的灌溉水环境质量最差。全县 99.31% 稻田土壤重金属级别为 1 级, 含量未超过标准值; 仅 0.69% 以石溪乡为主的稻田受到轻微污染, 级

别为 2 级, 这可能是由于自然成岩作用的影响。全县中部 25.81% 的稻田有益微量元素分值为最高 0.4 ~ 0.6 分, 奉新县属亚热带湿润气候, 中东部地处低山丘陵向低丘平原过渡地段, 气候温暖、热量充沛、降雨量丰富, 在气候、地形、母质、土壤以及人类耕作行为的综合影响下, 可能导致有益微量元素级别相对最高。

2) 奉新县稻田土壤健康评价结果表明, 奉新县稻田土壤健康状况良好, 74.67% 稻田土壤处在健康水平, 25.33% 稻田土壤为非常健康水平, 该县自然环境条件优越, 灌溉水环境质量总体中等偏下, 土壤污染问题较少, 综合有益微量元素的作用, 该县稻田土壤总体健康状况较好。

耕地是人类之根本, 为保障耕地资源的健康, 在生活中, 要控制农药化肥的施用, 控制污水、污染物的随意排放, 并逐步发展生态农业。当前, 针对耕地土壤健康评价的研究尚浅, 还处于探索阶段, 未形成统一的评价标准, 评价理论依据与方法也需要进一步探究, 耕地土壤健康与其影响因子之间的关系还处于定性分析阶段, 进一步的定量分析有待于在今后的研究中继续开展。

## 参考文献:

- [1] 赵永存, 徐胜祥, 王美艳, 等. 中国农田土壤固碳潜力与速率: 认识、挑战与研究建议[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 191-197.
- [2] 陈能场. 构建土壤健康助力化肥农药零增长[J]. 甘肃农业, 2015 (13): 57.
- [3] 沈仁芳, 王超, 孙波. “藏粮于地、藏粮于技”战略实施中的土壤科学与技术问题[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 135-144.
- [4] 董元华. 从战略高度关注土壤亚健康问题[J]. 民主与科学, 2016 (6): 15-17.
- [5] 健康土壤是什么样的[J]. 环境经济, 2015(2): 34.
- [6] 曹志洪. 施肥与土壤健康质量——论施肥对环境的影响(3)[J]. 土壤, 2003, 35(6): 450-455.
- [7] Leopold A. Wilderness as land laboratory[J]. Living Wilderness, 1941, 6(2): 3.
- [8] 李强, 苏强, 赵烨, 等. 基于土地产能的城郊农用地健康评价体系与方法探讨[J]. 地理与地理信息科学, 2008(1): 70-74.
- [9] Acton D F, Gregorich L J. Executive summary of the health of our soils toward sustainable agriculture in Canada[C]. Research branch: Centre for land and biological resources research, agriculture and agri-food Canada, Ottawa, Canada, 1996.
- [10] Pankhurst C E, Hawke B G, McDonald H J, et al. Evaluation of soil biological properties as potential bioindicators of soil health[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1995, 35(7): 1015-1028.
- [11] 单美. 耕地健康评价及其应用研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015.
- [12] 李强. 基于能值分析与模糊评价的粮食主产区耕地健康评价——以石家庄市栾城县为例[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(6): 85-89, 95.
- [13] 杨希越, 张明, 刘友兆, 等. 基于模糊物元分析法的耕地健康评价[J]. 经济研究导刊, 2015 (17): 40-43.

- [14] 谭晶今. 基于GIS的西南丘陵地区耕地健康评价研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [15] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [16] 史利江. 基于GIS和地统计学的土壤养分空间变异特征研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2006.
- [17] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范(HJ/T 166—2004) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [19] 宋春然, 何锦林, 谭红, 等. 贵州省农业土壤重金属污染的初步评价[J]. 贵州农业科学, 2005(2): 13—16.
- [20] 周惜时, 秦普丰, 李学初, 等. 洞庭湖平原区耕地环境质量初步评价[J]. 环境科学与技术, 2007(6): 55—56, 71, 118.
- [21] 胡坤, 喻华, 冯文强, 等. 淹水条件下不同中微量元素及有益元素对土壤pH和Cd有效性的影响[J]. 西南农业学报, 2010, 23(4): 1188—1193.
- [22] 林玉锁, 窦文倩, 张孝飞, 等. 徐州地区主要农产品生产基地农用灌溉水环境质量评价[J]. 农业环境与发展, 2002(6): 36—38.
- [23] 祝培甜, 赵中秋, 陈勇, 等. 江苏省某镇土壤重金属污染评价[J]. 环境工程学报, 2017, 11(4): 2535—2541.
- [24] 夏敏, 赵炳样, 张佳宝. 基于GIS的黄淮海平原典型潮土区土壤重金属积累研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 684—692.
- [25] 谢文, 郭熙, 赵小敏, 等. 基于木桶原理的县域耕地地力综合评价探析[J]. 江西农业大学学报, 2012, 34(4): 846—850.
- [26] 李爽. 基于木桶原理的南四湖湿地旅游空间容量研究[J]. 旅游纵览(下半月), 2016(1): 110—111.
- [27] 张洪, 单保庆, 尹澄清. 小尺度流域河湖水质关联性分析[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(2): 45—48, 56.
- [28] 沈体忠. 汉江下游农田灌溉水污染物质量浓度及风险评价——以天门市为例[C]. 第三届全国农业环境科学学术研讨会论文集, 2009: 6.
- [29] Tu C, Zheng C R, Chen H M. Effect of applying chemical fertilizers on forms of lead and cadmium in red soil[J]. Chemosphere, 2000, 41: 133—138.
- [30] Selene C H, Chou J, De Rosa C T. Case studies-Arsenic[J]. Int. J. Hyg. Environ. Health, 2003, 206: 381—386.
- [31] Nouri J, Mahvi A H, Jahed G R, et al. Regional distribution pattern of groundwater heavy metals resulting from agricultural activities[J]. Environmental Geology, 2008, 55: 1337—1343.
- [32] 李芳, 钱秋芳. 土壤重金属污染研究进展[J]. 安徽农学通报, 2011, 17(10): 80—82.
- [33] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 466—480.
- [34] 阿吉古丽·马木提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 艾尼瓦尔·买买提. 新疆焉耆县耕地土壤重金属的空间分布及来源解析[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(3): 12—16.
- [35] Jiao W T, Chen W P, Chang A C, et al. Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: A review[J]. Environmental Pollution, 2012, 168: 44—53.
- [36] 张乃明, 陈建军, 常晓冰. 污灌区土壤重金属累积影响因素研究[J]. 土壤, 2002, 34(2): 90—93.
- [37] 陈芳, 董元华, 安琼, 等. 长期肥料定位试验条件下土壤中重金属的含量变化[J]. 土壤, 2005, 37(3): 308—311.
- [38] 姜勇, 梁文举, 张玉革, 等. 污灌对土壤重金属环境容量及水稻生长的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(3): 129—132.
- [39] Sauer T J, Meek D W. Spatial variation of plant available Phosphorus in pastures with contrasting management[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 67: 826—836.
- [40] 张毅, 王昌全, 薛国祥, 等. 西昌市耕地土壤有效钼空间变异特征及影响因素分析[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(13): 2701—2705.
- [41] 江叶枫, 钟珊, 饶磊, 等. 江西省耕地土壤有效态微量元素含量空间变异特征及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5): 1159—1169.
- [42] 李珊, 张浩, 李启权, 等. 广元植烟土壤有效态微量元素的空间变异特征及影响因素[J]. 核农学报, 2017, 31(8): 1618—1625.
- [43] Momtaz H R, Jafarzadah A A, Torabi H, et al. An assessment of the variation in soil properties within and between land-form in the Amolrigon, Iran[J]. Geoderma, 2009, 149(1/2): 10—18.
- [44] Grieve I C. Human impacts on soil properties and their implications for the sensitivity of soil systems in Scotland[J]. Catena, 2001, 42: 361—374.
- [45] 链振峰, 南忠仁, 王胜利, 等. 黑河中游绿洲农田土壤微量元素含量的空间分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(5): 190—195.
- [46] 于斌, 梁留科. 河南省东北部农用地健康评价[J]. 中国土地科学, 2012, 26(8): 60—66.
- [47] 李强, 赵烨, 严金明. 城市化驱动机制下的农用地健康评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 301—307, 389.
- [48] 彭涛. 华北山前平原村级农田生态系统健康评价方法探讨——以河北省栾城县为例[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [49] 唐丽静. 基于元素地球化学的吉林黑土区土地健康评价[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [50] 肖振华, 万洪富. 灌溉水质对土壤水力性质和物理性质的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(3): 359—366.
- [51] 段飞舟, 高吉喜. 灌溉水质对污染区土壤重金属含量的影响分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(3): 450—455.
- [52] Song Y F, Wilke B M, Song X Y, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyls (PCBs) and heavy metals (HMs) as well as their genotoxicity in soil after long-term wastewater irrigation [J]. Chemosphere, 2006, 65(10): 1859—1868.
- [53] 胡坤, 喻华, 冯文强, 等. 中微量元素和有益元素对水稻生长和吸收镉的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2341—2348.
- [54] 韩术鑫, 王利红, 赵长盛. 内梅罗指数法在环境质量评价中的适用性与修正原则[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10): 2153—2160.
- [55] 谷朝君, 潘颖, 潘明杰. 内梅罗指数法在地下水水质评价中的应用及存在问题[J]. 环境保护科学, 2002, 28(1): 45—47.
- [56] 罗芳, 伍国荣, 王冲, 等. 内梅罗污染指数法和单因子评价法在水质评价中的应用[J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(5): 87—89.
- [57] 马懿, 周健, 黄治久, 等. 内梅罗污染指数法综合评价自贡市釜溪河水质现状[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(25): 15576—15577, 15621.
- [58] 郑利杰, 高红杰, 宋永会, 等. 我国典型城市地表水水质综合评价与分析[J]. 环境工程与技术学报, 2016, 6(3): 252—258.
- [59] 宋金茜, 朱权, 姜小三, 等. 基于GIS的农业土壤重金属风险评价研究——以南京市八卦洲为例[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 81—91.
- [60] 闫华, 欧阳明, 张旭辉, 等. 不同程度重金属污染对稻田土壤真菌群落结构的影响[J]. 土壤, 2018, 50(3): 513—521.
- [61] 安婧, 宫晓双, 陈宏伟, 等. 沈抚灌区农田土壤重金属污染时空变化特征及生态健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 37—44.
- [62] 杨玉敏, 师学义, 张琛. 基于内梅罗指数法的复垦村庄土壤重金属污染评价及空间分布[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 338—343.