

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.06.026

段碧辉, 孙奥, 王芳, 等. 荆门市耕地不同利用方式土壤质量综合评价. 土壤, 2023, 55(6): 1371–1379.

## 荆门市耕地不同利用方式土壤质量综合评价<sup>①</sup>

段碧辉, 孙奥, 王芳, 赵敏, 杨军, 项剑桥\*

(湖北省地质科学研究院, 武汉 430034)

**摘要:** 为研究江汉平原荆门地区耕地不同利用方式土壤质量, 以水田(水稻田、油稻田、麦稻田)、旱地土壤为研究对象, 测定土壤有机质、全量氮磷钾硫、速效磷钾和重金属 As、Cd、Cr、Hg、Ni、Pb 等 15 个指标, 采用因子分析确定权重并以间距法进行肥力综合评价, 以内梅罗综合指数法进行土壤环境质量综合评价, 两者叠加构造矩阵进行土壤质量综合评价。结果表明: 耕地土壤肥力总体较好, 土壤肥力综合指数为 4.45, 以二等和三等为主, 各养分指标含量中等及以上均超过 60%, 不同耕地利用方式土壤肥力不同, 以油稻田最高, 麦稻田次之, 水稻田和旱地最低; 耕地土壤环境质量较好, 以清洁为主, 不同耕地利用方式土壤环境不同, 油稻田和麦稻田无轻度及以上污染, 旱地有 1.25% 轻度污染, 水田有 1.27% 中度污染, 主要污染贡献为 Cd 和 Hg。综合评价显示研究区耕地土壤质量较好, 中等以上耕地占比 98.93%, 且以油稻田和麦稻田中等以上占比最高。

**关键词:** 耕地利用方式; 土壤肥力; 土壤环境; 土壤质量; 综合评价

中图分类号: S158 文献标志码: A

### Soil Quality Comprehensive Evaluation of Farmlands Under Different Use Patterns in Jingmen City, Hubei Province

DUAN Bihui, SUN Ao, WANG Fang, ZHAO Min, YANG Jun, XIANG Jianqiao\*

(Hubei Institute of Geosciences, Wuhan 430034, China)

**Abstract:** Soil quality of farmlands under different use patterns was assessed in Jingmen City of Jianghan Plan, Hubei Province in order to instruct scientific utilization and rational fertilization. In total, 364 soil samples were collected from 158 rice fields, 24 rape-rice fields, 18 wheat-rice fields and 80 dry lands, soil indexes were measured, including the contents of organic matter, total nitrogen, phosphorus, potassium and sulphur, the contents of available nitrogen, phosphorus and potassium, and the contents of heavy metals (As, Cd, Cr, Hg, Ni and Pb), the weights of soil indexes were decided through factor analysis, and soil comprehensive fertility index was calculated, soil comprehensive environment quality was assessed by Nemerow integrated pollution index method, and then soil comprehensive equality was evaluated by superimposing soil comprehensive fertility index and comprehensive environment quality. The results showed that soil comprehensive fertility index was 4.45, mainly in the 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> grades, more than 60% of the farmlands were in the medium and above grades in each soil index. Soil fertility was different under various land use patterns, with rape-rice field being the highest, followed by wheat-rice field, and rice fields and dry land being the lowest. Soil environmental quality was generally good, mainly in the clean grade, but which were various under different use patterns, no pollution in rape-rice fields, while 1.25% of dry lands was in light pollution and 1.27% of rice fields in medium pollution, which were mainly caused by Cd and Hg. The comprehensive evaluation showed that soil quality of farmlands in the study area generally was good, with 98.93% of the farmlands were above the middle level, and rape-rice field and wheat-rice field had the highest proportion above the middle level.

**Key words:** Cultivated land use patterns; Soil fertility; Soil environment; Soil quality; Comprehensive evaluation

①基金项目: 湖北省地质局项目(MSDZ202107、MSDZ202301)和湖北省长江经济带耕地质量地球化学评价项目(HBECC-ZB-ZC21055)资助。

\* 通讯作者(974559934@qq.com)

作者简介: 段碧辉(1988—), 男, 江西九江人, 硕士, 主要从事农业地质与环境研究。E-mail: 351927858@qq.com

耕地土壤质量直接关系到农作物的产量、质量和农业可持续发展等<sup>[1-3]</sup>。其中,土壤肥力作为土壤动态变化敏感指标,直接影响区域生态环境和作物的健康状况,是土壤物理、化学和生物性质相互作用的综合体现,它不仅反映土壤的管理水平,同时揭示土壤的恢复能力<sup>[4]</sup>。土壤环境直接影响到作物安全种植,关系到我国“菜篮子”和“米袋子”的安全,在风险土地种植作物可能会出现达不到质量安全标准等风险,最终通过食物链危害人体健康<sup>[5]</sup>。不同耕地利用方式直接影响着土壤质量,合理利用和调整耕地利用方式可以改善土壤质量,增强土壤肥力,而不合理利用和调整则会破坏土壤的结构,造成养分流失,降低耕地生产力。因此,全面客观地评价土壤质量对指导科学施肥、精准农业和田间管理等具有重要的意义<sup>[6]</sup>。

土壤质量评价是以生产功能和生态健康为基础的评价,大部分研究主要是在耕地和大棚等尺度评价土壤肥力与施肥、种植模式和耕种方式等相结合的评价内容<sup>[7-8]</sup>,少部分将土壤肥力和重金属结合评价,其不仅能反映出土壤提供作物生长所需的养分,还能体现出土壤的污染健康状况<sup>[9]</sup>。耕地利用方式的变化从影响种植结构、土壤环境、土壤肥力以及农田生态系统的养分循环等方面影响土壤质量。陈鑫等<sup>[10]</sup>对太湖地区研究发现,与冬闲水田相比,麦稻田土壤有机质变化不明显,土壤全磷、有效磷和速效钾等养分含量均有明显提高;王广军等<sup>[11]</sup>对琼海和安定地区研究发现,水田、旱地和抛荒地重金属含量、形态以及来源均有不同。另外,土壤肥力评价根据评价对象和目的不同选用不同评价指标,如王璐等<sup>[12]</sup>选择土壤密度和含水率,陈颖等<sup>[13]</sup>选择土壤化学性质,杨媛媛等<sup>[14]</sup>选择土壤生物性质,樊亚男等<sup>[15]</sup>选择作物产量和养分,张杰等<sup>[16]</sup>选择土壤物理、化学和生物指标综合评价土壤肥力。评价方法主要有模糊数学法、因子分析法、聚类分析法、主成分分析法等<sup>[17]</sup>。土壤环境评价主要选择 8 种重金属进行评价,评价方法主要有富集因子法、内梅罗污染指数法、地累积指数法和潜在生态风险指数法等<sup>[18]</sup>。荆门市是湖北省重要的粮食产区 and 农产品生产基地,关于其耕地土壤质量评价鲜见研究。本文采用土壤肥力和环境评价相结合的方法,通过对研究区不同耕地利用方式下土壤的 pH、有机质、养分和重金属含量进行分析,采用因子分析确定权重进行综合肥力等级评价,以内梅罗污染指数法进行土壤环境综合评价,最终叠加构造矩阵进行土壤质量综合评价,以期为全面认识和科学评价荆门市耕地土壤质量状况,科学管理和合理施肥提

供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

荆门市位于湖北省中部,长江中下游,是长江经济带重要节点城市,地理位置 111°51'E ~ 113°29'E, 30°32'N ~ 31°36'N。东西最大横距为 155 km,南北最大纵距为 131 km,年平均气温相对稳定(15.6 ~ 16.3 °C),年均降水量差异明显(804 ~ 1 067 mm)。地貌类型相对复杂,分布着平原、丘陵和山地,地表起伏相对较大,海拔介于 27 ~ 1 050 m。成土母质多样,主要为河流冲积物、湖积物、碳酸盐岩等。耕地以水田为主,占比 64.6%,主要分布在研究区中部、南部和东部地区;其次为旱地,占比 33.7%,主要分布在汉江两侧;水浇地最少,占比 1.7%,全区零星分布。经调查研究区种植作物主要为水稻、小麦和油菜等,且水田冬季大部分处于休耕状态,其他耕地种植作物多为一年两熟。

### 1.2 土壤样品采集及处理

本研究于 2021 年 4—5 月采集土壤样品,综合考虑土壤类型、土地利用类型和地质背景等因素,通过 GPS 定位在研究区内采集耕地土壤样品 280 件(水稻田 158 件, R; 油稻田 24 件, RO; 麦稻田 18 件, RW; 旱地 80 件, L)。采样时在同一地块内利用五点采样法将 5 件土壤子样等量混合组成一件样品,去除石块和植物残体等后采用四分法留取 1 kg 样品,同时记录采样坐标、地质背景、土壤类型、成因类型、农作物种类及种植制度等信息。土壤样品在自然条件下晾晒风干,干燥后样品经加工过 20 目尼龙筛后装袋备测,样品分析测试由自然资源部武汉矿产资源监督检测中心完成。

### 1.3 指标测定

本研究样品分析测试方法、分析准确度和精确度均参考文献[19-20]。土壤有机质(SOM)含量和阳离子交换量(CEC)采用容量法测定,全氮(TN)采用元素分析仪法测定,全钾(TK)和全磷(TP)采用 X 射线荧光光谱法测定,全硫(TS)采用高频燃烧红外吸收法测定,有效磷(AK)和速效钾(AP)采用电感耦合等离子体原子发射光谱法测定,酸碱度采用离子选择性电极法测定。土壤 As 和 Hg 采用原子荧光法(AFS)测定, Cd 采用等离子体质谱法(ICP-MS)测定, Cr、Ni 和 Pb 采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定。

### 1.4 土壤质量评价方法

**1.4.1 土壤肥力评价** 本研究土壤肥力评价以土

壤化学肥力评价为主,根据研究区种植作物实际情况和需肥特点,选取 SOM、TN、TP、TK、AP、AK、TS 7 个指标开展研究区耕地土壤肥力得分计算。

1)肥力综合得分计算。土壤肥力综合得分计算是在各单指标肥力等级划分的基础上,按照如下公式计算得出。

$$F_f = \sum_{i=1}^n k_i f_i \quad (1)$$

式中:  $F_f$  为土壤 SOM、TN、TP、TK、AP、AK、TS 肥力评价综合得分,  $1 \leq F_f \leq 6$ ;  $k_i$  为各指标权重系数;  $f_i$  为土壤各指标的单元素等级得分, 6 等、5 等、4 等、3 等、2 等、1 等所对应的  $f_i$  得分分别为 1、2、3、4、5、6 分。土壤肥力综合等级划分见

表 1 土壤肥力等级划分标准  
Table 1 Classification standard of soil comprehensive fertility

指标	一等	二等	三等	四等	五等	六等
SOM(g/kg)	≥40	30 ~ 40	20 ~ 30	10 ~ 20	6 ~ 10	<6
TN(g/kg)	≥2.00	1.50 ~ 2.00	1.00 ~ 1.50	0.75 ~ 1.00	0.50 ~ 0.75	<0.5
TP(g/kg)	≥1.00	0.80 ~ 1.00	0.60 ~ 0.80	0.40 ~ 0.60	0.20 ~ 0.40	<0.2
TK(g/kg)	≥25	20 ~ 25	15 ~ 20	10 ~ 15	5 ~ 10	<5
AP(mg/kg)	≥40	20 ~ 40	10 ~ 20	5 ~ 10	3 ~ 5	<3
AK(mg/kg)	≥200	150 ~ 200	100 ~ 150	50 ~ 100	30 ~ 50	<30
TS(mg/kg)	≥343	270 ~ 343	219 ~ 270	172 ~ 219	125 ~ 172	<125
$F_f$	≥5.5	4.5 ~ 5.5	3.5 ~ 4.5	2.5 ~ 3.5	1.5 ~ 2.5	<1.5

表 2 土壤肥力指标权重  
Table 2 Weights of soil fertility indexes

评价指标	SOM	TN	TP	TK	AP	AK	TS
公因子方差	0.95	0.93	0.82	0.69	0.74	0.72	0.87
$k_i$	0.17	0.16	0.14	0.12	0.13	0.13	0.15

1.4.2 土壤环境质量评价 采用单因子指数法和内梅罗综合指数法对研究区土壤环境质量进行评价。

1)单因子污染指数。单因子污染指数可以有效评估重金属污染状况和估计人类活动的影响,是对某一项污染指标进行分析评价。

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (2)$$

式中:  $P_i$  为单因子污染指数;  $C_i$  为重金属  $i$  的实测含量;  $S_i$  为重金属  $i$  的农用地土壤污染风险筛选值。

2)内梅罗综合污染指数。内梅罗污染指数法能够反映各污染物对土壤的影响,具有突出最大污染物对土壤环境质量影响的优点。

$$P_{综} = \sqrt{\frac{P_{iavg}^2 + P_{imax}^2}{2}} \quad (3)$$

表 1。本次土壤肥力评价参考全国第二次土壤普查技术规程规定的肥力分级标准和中国地质调查局 DZ/T0295—2016 《土地质量地球化学评价规范》<sup>[21]</sup> 中分级标准(表 1)。

2)评价指标权重( $k_i$ )的确定。权重表征的是各个评价指标对评价对象贡献力度,本研究通过因子分析计算各指标权重。KMO 检验和 Bartlett's 球形检验(KMO=0.616>0.6; Sig.=0.000<0.01)结果显示,各肥力指标之间适合做因子分析。计算各指标成分矩阵,提取主成分(土壤肥力指数前 3 个主成分特征值均大于 1, 累计贡献率 82.9%)计算各指标的公因子方差,将各指标公因子方差的提取值占比作为各肥力指标的权重( $k_i$ ),见表 2。

式中:  $P_{综}$  为内梅罗综合污染指数;  $P_{iavg}$  为单因子污染指数的平均值;  $P_{imax}$  为单因子污染指数最大值。单因子和综合污染指数评价表标准见表 3。

表 3 单因子和综合污染指数评价标准  
Table 3 Evaluation standards of single index and comprehensive pollution index

单因子污染指数	综合污染指数	污染等级
$P_i \leq 1$	$P_{综} \leq 0.7$	清洁
$1 < P_i \leq 2$	$0.7 < P_{综} \leq 1.0$	尚清洁
$2 < P_i \leq 3$	$1.0 < P_{综} \leq 2.0$	轻度污染
$3 < P_i \leq 4$	$2.0 < P_{综} \leq 3.0$	中度污染
$P_i > 5(G_i/S_i)$	$P_{综} > 3.0$	重度污染

注:  $G_i$  为  $i$  元素的农用地土壤污染风险管控值,标准优先执行  $P_i > (G_i/S_i)$  时,污染等级为重度污染。

1.4.3 土壤质量综合评价 土壤质量综合等级由评价单元的土壤化学肥力综合等级与土壤环境综合等级叠加形成,其表达含义见表 4。

### 1.5 数据分析

利用 Excel 2010 对基础数据进行处理和作图,采用 SPSS 21.0 进行变异系数、显著性和因子分析等。

表 4 土壤质量综合评价标准

Table 4 Standard of soil comprehensive environment quality

土壤肥力等级	清洁	尚清洁	轻度污染	中度污染	重度污染
一等	优质	中等	较差	差等	劣等
二等	优质	中等	较差	差等	劣等
三等	良好	中等	较差	差等	劣等
四等	中等	中等	较差	差等	劣等
五等	较差	较差	较差	差等	劣等
六等	差等	差等	差等	差等	劣等

表 5 土壤肥力指标含量参数统计表

Table 5 Descriptive statistics of soil fertility indexes

指标	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数
TN(g/kg)	0.58	4.08	1.80	0.53	0.29
TP(g/kg)	0.37	1.80	0.73	0.23	0.32
TK(g/kg)	10.21	27.63	17.31	3.65	0.21
SOM(g/kg)	8.62	58.62	31.30	10.29	0.33
AK(mg/kg)	49.00	567.00	194.46	79.07	0.41
AP(mg/kg)	0.21	77.90	15.26	14.10	0.92
TS(mg/kg)	98.00	781.00	327.07	120.52	0.37
CEC(cmol/kg)	4.24	29.60	16.92	4.86	0.29
pH	4.69	8.37	6.61	1.01	0.15

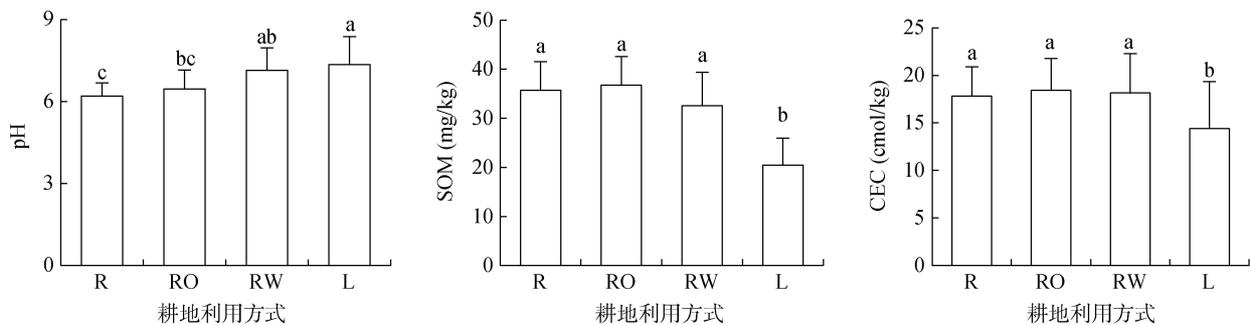
## 2 结果与分析

### 2.1 耕地土壤肥力特征

**2.1.1 土壤肥力的描述性统计分析** 耕地土壤养分统计特征见表 5。由表可知, 研究区耕地土壤 pH 总体呈中性。土壤 SOM 含量范围 8.62 ~ 58.62 g/kg, 均值为 31.30 g/kg, 依据土壤肥力等级划分标准(表 1), SOM 含量处于二等。土壤 TN、TP、TK 和 TS 含量范围分别为 0.58 ~ 4.08、0.37 ~ 1.80、10.21 ~ 27.63 g/kg 和 98.0 ~ 781.0 mg/kg, 均值分别为 1.80、0.73、17.31 g/kg 和 327.07 mg/kg; 其中, 土壤 TN 和 TS 含量处于二等, TP 和 TK 处于三等。土壤 AK 和 AP 含量范围分别为 49 ~ 567 和 0.21 ~ 77.9 mg/kg, 均值分别为 194.46 和 15.26 mg/kg, 其中, 土壤 AK 处于二等, AP 处于三等。土壤 CEC 含量范围为 4.24 ~ 29.60 cmol/kg, 均值为 16.92 cmol/kg。变异系数可反映肥力指标的空间变异程度以及与人类活动之间的关系, 变异系数越大则说明人类活动的参与度越高。研究区耕地土壤肥力指标的变异系数依次为 AP>AK>TS>SOM>TP>TN=CEC>TK>pH, 变异系数最大为 AP, 达 0.92, 变异强度高, 且远高于其他指标; 土壤 TK 和 pH 变异系数分别为 0.21 和 0.15, 属均匀分布型; 土壤 TN、TP、SOM、TS 和 AK 变异

系数介于 0.25 ~ 0.50, 属相对分异型。

**2.1.2 耕地不同利用方式对土壤肥力的影响** pH 是土壤的一项重要化学性质, 直接影响土壤中养分元素的赋存形态。不同耕地利用方式下, 耕地土壤的 pH 存在差异(图 1)。水田中水稻田土壤 pH 最低, 其次为油稻田, 麦稻田最高, 均值分别为 6.20、6.46、7.14, 麦稻田显著高于水稻田; 旱地土壤 pH 为 7.34, 显著高于水稻田和油稻田。SOM 是土壤养分的重要来源, 是衡量土壤肥力水平的基础, 实施有机管理可以有效改善土壤质量<sup>[22]</sup>。不同耕地利用方式土壤的 SOM 含量存在差异(图 1)。水田中 SOM 含量大小依次为油稻田>水稻田>麦稻田, 均值分别为 36.74、35.70、32.60 g/kg; 旱地土壤 SOM 含量为 20.46 g/kg。总体来看, 水田土壤中 SOM 含量明显高于旱地。CEC 是指土壤胶体所能吸附的各种阳离子的总量, 是衡量土壤保肥能力的重要指标。CEC 含量大小依次为油稻田>麦稻田>水稻田>旱地, 均值分别为 18.44、18.15、17.81 和 14.4 cmol/kg。总体来看, 水田 3 种利用方式对 CEC 含量影响不明显, 旱地土壤 CEC 显著低于水田。



(图中小写字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ ), 下同)

图 1 不同耕地利用方式土壤 pH、SOM 与 CEC 含量

Fig.1 Soil pH, SOM and CEC of farmlands under different use patterns

土壤 TN、TP、TK、TS 是土壤肥力的重要组成部分，是维持作物生长所需氮磷钾硫的养分库，是反映土壤肥力供应状况的重要指标。从图 2 中可以看出，不同利用方式土壤 TN 与 TS 含量相似，油稻田>水稻田>麦稻田>旱地，均值分别为 2.04、1.98、1.87、1.33 g/kg 和 389.46、372.96、333.94、214.45 mg/kg，水田土壤 TN 和 TS 含量明显高于旱地。不同利用方式土壤 TP 和 TK 含量相似，旱地>麦稻田>油稻田>水稻田，均值分别为 0.85、0.81、0.77、0.66 g/kg 和 20.08、18.86、16.72、15.81 g/kg，旱地 TP 和 TK 含量高于水田。土壤有效态养分与作物生长有着密切的关系，对作物产量和品质有较大的影响。由图 2 可知，土壤中 AP 含量大小依次为旱地>油稻田>麦稻田>水稻田，均值分别为 21.81、21.71、20.74 和 10.33 mg/kg；

总体来看，旱地 AP 含量高于水田。土壤 AK 含量大小依次为水稻田>旱地>麦稻田>油稻田，均值分别为 203.81、187.1、180.89 和 167.21 mg/kg；总体来看，AK 含量均值在旱地和水田中差异不显著。

**2.1.3 耕地不同利用方式对综合肥力的影响** 土壤的肥力水平是诸多肥力指标综合作用的反映。根据土壤肥力综合指数计算公式，计算研究区耕地土壤样品的肥力综合指数( $F_i$ )，如表 6 所示。依据土壤肥力综合指数整体评价，研究区耕地土壤肥力综合指数范围为 2.87~5.75，均值为 4.45，肥力综合等级为三等，且三等及以上占比 92.86%，耕地土壤肥力状况较好。耕地不同利用方式土壤肥力综合指数以油稻田最高，指数均值为 4.54；麦稻田次之，土壤肥力综合指数为 4.46；水稻田和旱地最低。

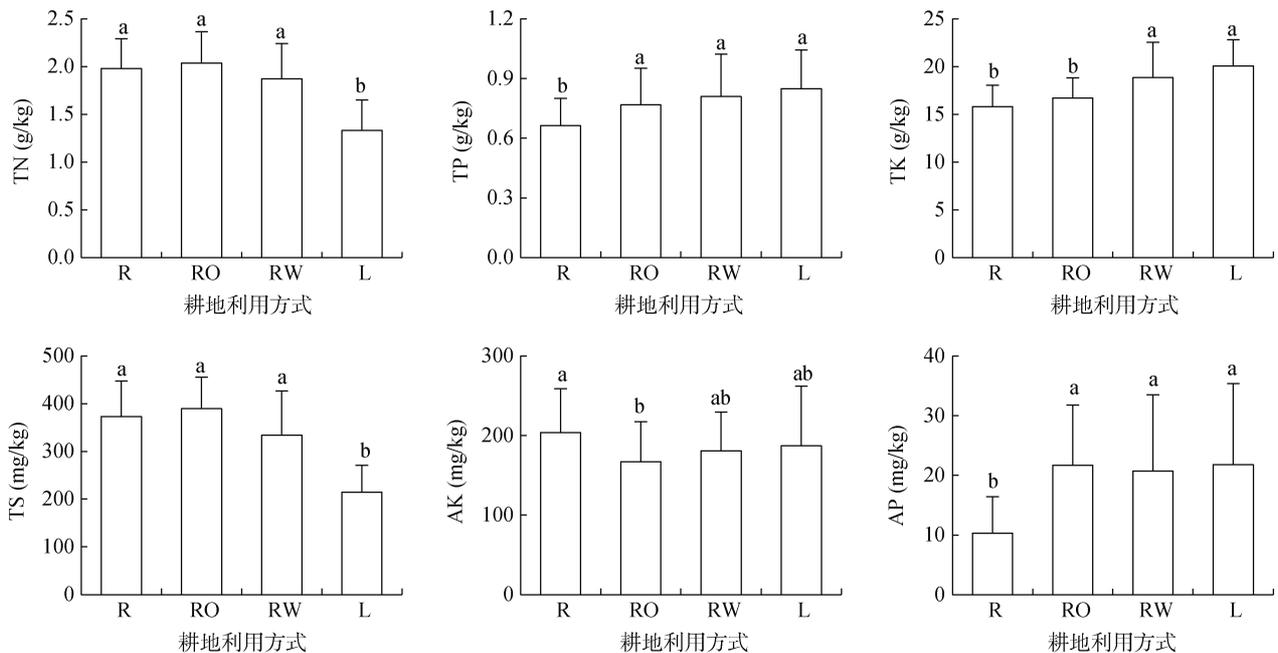


图 2 不同耕地利用方式土壤养分含量

Fig.2 Soil nutrient contents of farmlands under different use patterns

表 6 耕地土壤综合肥力等级占比

Table 6 Proportions of soil comprehensive fertility grades of farmlands under different use patterns

指标	耕地利用方式	最小值	最大值	均值	不同等级样品数占比(%)					
					一等	二等	三等	四等	五等	六等
土壤肥力综合指数( $F_i$ )	R	3.06	5.61	4.44	1.90	49.37	43.67	5.06	0.00	0.00
	RO	3.37	5.75	4.54	8.33	41.67	45.83	4.17	0.00	0.00
	RW	3.23	5.48	4.46	0.00	50.00	38.89	11.11	0.00	0.00
	L	2.87	5.63	4.44	3.75	45.00	40.00	11.25	0.00	0.00
	综合	2.87	5.75	4.45	2.86	47.50	42.50	7.14	0.00	0.00

2.2 耕地土壤环境特征

2.2.1 土壤重金属的描述性统计 研究区的土壤重金属含量参数统计见表 7。土壤 As、Cd、Cr、Hg、

Ni 和 Pb 含量范围分别为 3.56~46.00、0.07~0.61、42.90~116.00、0.02~1.70、7.75~68.60 和 17.10~42.50 mg/kg，平均值分别为 11.84、0.22、76.58、0.09、

33.32 和 28.29 mg/kg。与全国土壤背景值相比, As、Cd、Cr、Hg、Ni 和 Pb 分别有 53.57%、95%、91.07%、52.5%、81.43% 和 75% 的点位超过其背景值。耕地土壤重金属元素含量变异系数由大到小依次为 Hg>Cd>As>Ni>Cr>Pb。其中, 高度变异的有 Hg, 说明

Hg 元素空间异质性较强, 可能存在点源污染; 中等变异的元素为 Cd 和 As, 说明 Cd 和 As 的空间异质性较大; 弱变异的有 Cr、Pb 和 Ni, 说明这些元素在土壤中的分布比较均匀并且受到外界环境影响较小。

表 7 土壤重金属含量参数统计表  
Table 7 Descriptive statistics of soil heavy mental contents

指标	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数	全国土壤背景值
As(mg/kg)	3.56	46.00	11.84	3.98	0.34	11.2
Cd(mg/kg)	0.07	0.61	0.22	0.10	0.45	0.1
Cr(mg/kg)	42.90	116.00	76.58	13.09	0.17	61
Hg(mg/kg)	0.02	1.70	0.09	0.14	1.56	0.07
Ni(mg/kg)	7.75	68.60	33.32	8.19	0.25	26.9
Pb(mg/kg)	17.10	42.50	28.29	4.25	0.15	26

**2.2.2 耕地不同利用方式对重金属含量的影响** 不同耕地利用方式土壤重金属含量见图 3。由图可知, 同一种重金属元素在不同利用方式土壤中含量存在差异。Cd 含量为旱地=麦稻田>油稻田>水稻田, 旱地和麦稻田的 Cd 含量显著高于油稻田和水稻田。Cr 含量为麦稻田>旱地>水稻田>油稻田, 油稻田 Cr 含量显著低于麦稻田和旱地。Ni 含量为麦稻田>旱地>水稻田>油稻田, 水稻田和油稻田 Hg 含量显著低于麦稻田和旱地。Hg 含量为水稻田=麦稻田>油稻田>旱地, 旱地 Hg 含量显著低于稻田。Pb 含量为水稻田>油稻田>麦稻田>旱地, 旱地 Pb 含量显著低于水稻

田和油稻田。As 含量为油稻田>麦稻田=水稻田>旱地, 各耕地利用方式之间无显著差异。

**2.2.3 耕地土壤环境质量评价** 通过单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法计算了研究区内土壤样点的污染指数及其污染级别占比。由表 8 可知, As、Cd、Cr、Hg、Ni 和 Pb 的单项污染指数均值分别为 0.32、0.47、0.31、0.14、0.37 和 0.25, 范围分别为 0.07~1.15、0.14~1.60、0.17~0.68、0.01~3.40、0.08~0.73 和 0.08~0.53。通过  $P_i$  得出 Cr、Ni 和 Pb 属于清洁等级, As 和 Cd 分别出现了 0.36% 和 1.07% 尚清洁点位, Hg 出现了 0.71% 的中度污染点位, 无

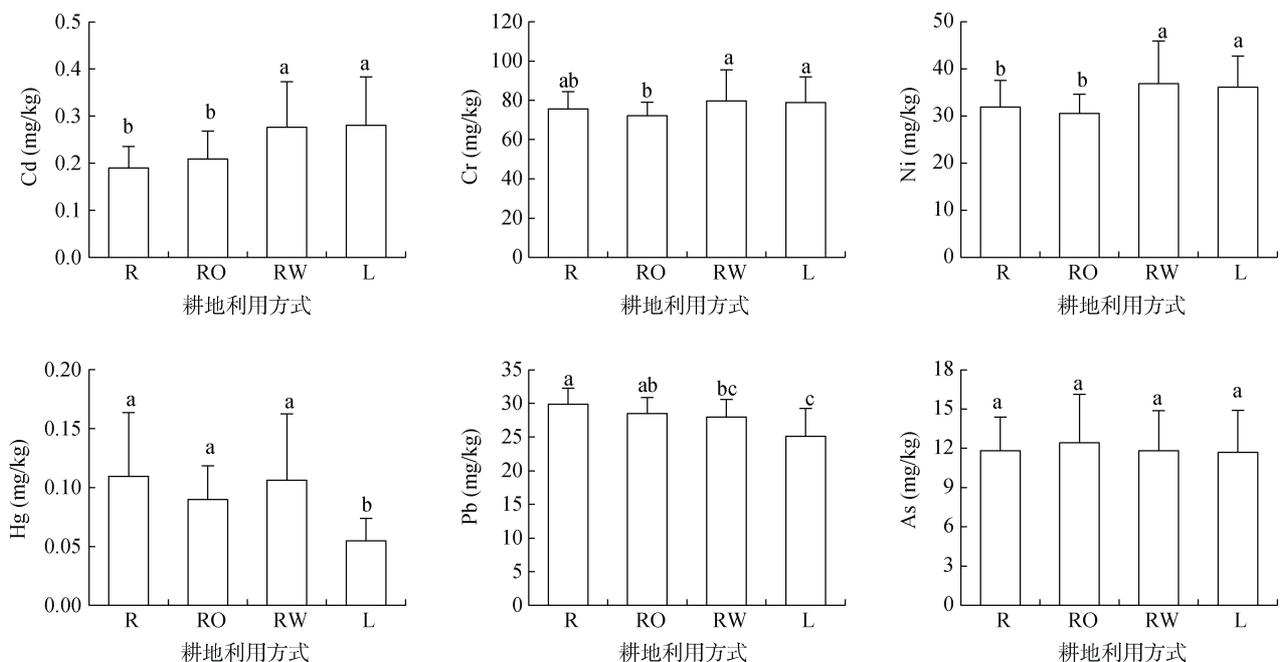


图 3 不同耕地利用方式土壤重金属含量

Fig.3 Soil heavy mental contents of farmlands under different use patterns

表 8 耕地土壤污染重金属指数  
Table 8 Heavy metal pollution indexes of farmlands

污染指数	元素/耕地利用方式	最小值	最大值	均值	不同污染级别样点占比(%)				
					清洁	尚清洁	轻度污染	中度污染	重度污染
$P_i$	As	0.07	1.15	0.32	99.64	0.36	0	0	0
	Cd	0.14	1.60	0.47	98.93	1.07	0	0	0
	Cr	0.17	0.68	0.31	100	0	0	0	0
	Hg	0.01	3.40	0.14	99.29	0	0	0.71	0
	Ni	0.08	0.73	0.37	100	0	0	0	0
	Pb	0.08	0.53	0.25	100	0	0	0	0
各监测点综合污染指数( $P_{\text{总}}$ )	综合	0.23	2.46	0.44	97.14	1.79	0.36	0.71	0.00
	R	0.25	2.48	0.43	97.47	1.27	0.00	1.27	0.00
	RO	0.26	0.88	0.39	95.83	4.17	0.00	0.00	0.00
	RW	0.24	0.72	0.40	94.44	5.56	0.00	0.00	0.00
	L	0.23	1.20	0.47	97.50	1.25	1.25	0.00	0.00

重度污染点位。从综合污染指数来看，研究区耕地土壤污染指数范围为 0.23~2.46，均值 0.44，清洁点位占比 97.14%，尚清洁点位占比 1.79%，轻度污染点位占比 0.36%，中度污染点位占比 0.71%，无重度污染点位。不同耕地利用方式土壤污染综合指数不同，其中油稻田最低，土壤污染综合指数为 0.39；麦稻田次之，土壤污染综合指数为 0.40；旱地最高，土壤污染综合指数为 0.47。

2.3 耕地土壤质量

研究区耕地土壤质量等级由土壤化学肥力综合等级与土壤环境综合等级叠加形成，将耕地按照土壤质量划分为优质、良好、中等、较差、差等和劣等共 6 种类型，不同耕地利用方式土壤质量等级占比见图 4。由图可知，研究区耕地土壤质量各等级占比大小依次为：优质(48.93%)>良好(41.07%)>中等(8.93%)>较差(0.36%)>差等(0.71%)>劣等(0%)。不同耕地利用方式土壤质量存在差异，中等及以上耕地占比大小依次为油稻田、麦稻田(100%)>旱地(98.93%)>水稻田(98.74%)。

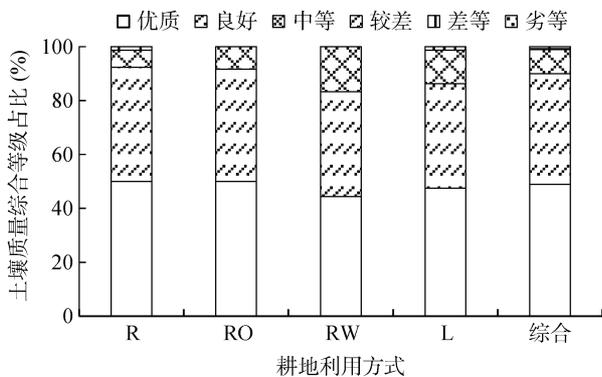


图 4 不同耕地利用方式土壤质量等级占比  
Fig.4 Proportions of soil comprehensive quality grades of farmlands under different use patterns

3 讨论

3.1 耕地不同利用方式对土壤肥力的影响

研究区土壤 pH 变异系数最小，这与王伟妮等<sup>[23]</sup>对江汉平原的研究相似。TN、TP、TK 等的变异系数均为中等变异，AP 和 AK 变异系数最大，且 AP 为高度变异，说明江汉平原荆门地区土壤 AP 分布极不均匀，表明耕地土壤有效养分受人为因素干扰较大，可能是由于农民的耕作方式及施肥所致，这与张涛<sup>[24]</sup>对江汉平原其他地区土壤养分特征的研究相似。另外，研究区耕地 TN 含量处于土壤肥力等级二等，TP、TK 处于三等，土壤有效养分 AK 处于二等，AP 处于三等，说明土壤供氮和供钾能力较强，土壤氮素和钾素投入可能造成氮钾在土壤中积累残留较多。

土壤肥力受成土母质、气候、地形、人类活动等成土因素的影响<sup>[25]</sup>。研究区土壤 pH 总体呈中性，水田 pH 明显低于旱地，且水田中土壤 pH 为水稻田<油稻田<麦稻田，说明水田轮作可以稳定土壤酸碱度。土壤 SOM 含量处于土壤肥力等级二等，水田土壤 SOM 含量明显高于旱地，水田中以麦稻田最低。这可能是由于水田淹育条件下微生物降解活动慢，减缓 SOM 消耗；而旱地土壤长期处于氧化环境，有机碳来源减少，SOM 很难积累，土壤团粒体结构发生变化，对碳的吸附能力降低，最终导致土壤 SOM 含量降低<sup>[26-29]</sup>。旱地土壤 CEC 明显低于水田，说明水田保肥能力更强，这可能与研究区旱地集中分布在江汉两侧，土壤类型以潮土为主，土壤质地偏砂质有关。另外，油稻田和麦稻田 CEC 均高于水稻田，表明水田水旱轮作可以提高 CEC，改善土壤结构，这与张永慧等<sup>[30]</sup>的研究相似。旱地土壤 TN、TS 含量明显

低于水田,且水田中以麦稻田最低,这可能是由于人为淹水耕作,土壤长期处于还原条件,加之秸秆还田等因素影响,有利于氮、硫素的积累<sup>[31-32]</sup>;水田土壤 TP、TK 含量明显低于旱地,且水田中以麦稻田最高,说明旱地土壤更容易出现土壤磷、钾养分累积,这与前人关于水田旱地土壤养分差异研究结论一致<sup>[30, 33]</sup>。总体看,水稻田进行轮作可以提升土壤肥力状况,改善土壤质量,这与王志强等<sup>[34]</sup>和张鹏等<sup>[35]</sup>研究结果相似。

土壤肥力是土壤最重要的生态功能之一,掌握土壤养分含量特征是管理好土壤养分和合理施肥的基础<sup>[36]</sup>。土壤肥力综合评价是土壤肥力高低的评判和鉴定,不仅受土壤养分指标独立影响,更取决于各因子的协调程度。因此,在单一土壤化学肥力指标评价的基础上,还要进行肥力综合评价。土壤肥力综合指数数值范围为 1.0~6.0,最大值 6.0 表示土壤肥力完全满足作物生长,1.0 表示严重制约作物生长。研究区土壤综合肥力指数范围为 2.83~5.75,对照土壤肥力等级为一至四等,综合肥力指数处于三等偏上。另外,研究发现油稻田和麦稻田土壤肥力综合指数高于水稻田和旱地,表明通过轮作方式可以提高土壤肥力,这与陈鑫等<sup>[10]</sup>对太湖地区的研究相似。

### 3.2 耕地不同利用方式对土壤环境的影响

研究区耕地土壤 Cr、Pb 和 Ni 表现为弱变异,Cd 和 As 表现为中度变异,Hg 表现为高度变异,表明土壤重金属不只受土壤本底值影响,还可能受到化肥与农药施用、灌溉、大气沉降、固体废弃物堆放等干扰<sup>[37]</sup>。不同耕地利用方式对土壤 Cd、Cr、Hg、Pb 和 Ni 的含量有不同程度的影响,但对土壤中 As 含量影响不明显。旱地土壤 Cr、Ni 和 Cd 明显高于水田,其中 Cr 和 Ni 与变异系数对应,可能主要来源于成土母岩和成土过程。前人研究表明汉江中上游秦岭造山带表壳主要岩系为基性火山岩,Cr 和 Ni 相对富集,由河流作用沉积于研究区汉江两侧,造成旱地 Cr 和 Ni 含量偏高<sup>[38]</sup>。Cd 除秦岭造山带表壳岩系富 Cd 的基性火山岩和碎屑岩等成土母岩的影响,还可能与土壤 pH 升高有利于增强土壤对 Cd 等的吸附能力有关<sup>[39]</sup>。水田土壤 Hg 显著高于旱地,可能与 SOM 含量相关,SOM 含量越高对土壤 Hg 的吸附作用越强,离子活度降低,促进 Hg 的累积有关<sup>[40]</sup>。水田土壤 Pb 显著高于旱地,这与李奕等<sup>[41]</sup>对江西萍乡耕地土壤研究结果相似,与农药和肥料施用有关。用单因子污染指数法和内梅罗综合污染评价法共同评估研究区耕地土壤环境,两种评价结果基本相同,耕地土

壤 Cr、Ni 和 Pb 处于清洁水平,未对土壤造成污染,As 和 Cd 分别出现了 0.36% 和 1.07% 尚清洁点位,Hg 存在中度点状污染。不同耕地利用类型的内梅罗综合指数评价结果依次为旱地>水稻田>麦稻田>油稻田,这可能与油稻轮作降低 Cr、Ni、Hg 和 Pb 含量有关,轻度污染和重度污染点位分别出现在旱地和水稻田中,麦稻田和油稻田无轻度污染及以上点位,表明轮作可能改善土壤重金属污染状况。

### 3.3 耕地土壤质量综合评价

研究区土壤综合质量评价首先采用因子分析提取方差确定养分指标权重,综合指标权重以间距法确定肥力综合等级,然后采用内梅罗综合评价法确定土壤环境质量等级,最终两者叠加构造矩阵进行土壤质量综合评价。该方法综合考虑耕地土壤总体化学肥力和土壤重金属污染状况,将土壤质量划分为 6 种级别,能够全面反映研究区土壤质量。研究区耕地优质点位占比 48.93%,反映土壤肥力丰富或者较丰富,土壤环境清洁;良好点位占比 41.07%,反映土壤肥力中等,土壤环境清洁;中等点位占比 8.93%,反映土壤肥力较缺乏,土壤环境清洁或尚清洁;较差占比 0.36%,反映土壤肥力缺乏,土壤环境清洁至轻度污染;差等占比 0.71%,反映土壤肥力极缺乏,土壤环境清洁至中度污染;劣等耕地反映土壤环境重度污染,研究区无劣等土地。不同耕地利用方式土壤质量存在差别,研究区油稻田和麦稻田均无较差和差等土壤,水稻田存在差等土壤,旱地存在较差土壤,表明轮作可以改善土壤质量。

## 4 结论

研究区耕地土壤整体肥力较好,土壤肥力综合指数为 4.45,以二等和三等为主,各养分含量中等及以上均超过 60%。不同耕地利用方式土壤肥力不同,以油稻田最高,麦稻田次之,水稻田和旱地最低;土壤 SOM、TN 和 TS 含量依次为油稻田>水稻田>麦稻田>旱地,TP 和 TK 含量依次为旱地>麦稻田>油稻田>水稻田,AP 含量依次为油稻田>旱地>麦稻田>水稻田。研究区土壤环境质量较好,以清洁为主,不同耕地利用方式土壤环境不同,旱地存在 1.25% 轻度污染,水田存在 1.27% 中度污染,贡献力度主要为 Cd 和 Hg。总体来看,研究区土壤质量较好,中等以上耕地占比 98.93%,其中油稻田和麦稻田中等以上均占比 100%,表明轮作可以通过改善土壤肥力和土壤环境状况提升耕地土壤质量。

## 参考文献:

- [1] Yang H S. Resource management, soil fertility and sustainable crop production: Experiences of China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 116(1/2): 27-33.
- [2] Altieri M A, Nicholls C I. Soil fertility management and insect pests: Harmonizing soil and plant health in agroecosystems[J]. *Soil and Tillage Research*, 2003, 72(2): 203-211.
- [3] Mäder P, Fließbach A, Dubois D, et al. Soil fertility and biodiversity in organic farming[J]. *Science*, 2002, 296(5573): 1694-1697.
- [4] 靳正忠, 雷加强, 李生字, 等. 流动沙漠腹地防护林土壤肥力质量垂直演化与评价[J]. *土壤学报*, 2010, 47(6): 1075-1085.
- [5] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准: GB 15618—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [6] 陈强, 杨劲松, 姚荣江, 等. 河套平原典型县域耕地土壤养分空间变异特征研究[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(10): 102-108.
- [7] 孟敏, 杨林生, 韦炳干, 等. 我国设施农田土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(11): 1019-1026.
- [8] 孟博, 周一帆, 杨林生, 等. 勐海县甘蔗土壤养分空间分布特征及肥力评价[J]. *土壤*, 2022, 54(2): 277-284.
- [9] 李颖慧, 姜小三, 王振华, 等. 基于土壤肥力和重金属污染风险的农用地土壤质量综合评价研究——以山东省博兴县为例[J]. *土壤通报*, 2021, 52(5): 1052-1062.
- [10] 陈鑫, 刘勤, 张刚. 太湖地区不同轮作模式对土壤肥力和水稻产量的影响[J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(4): 874-883.
- [11] 王军广, 赵志忠, 王鹏, 等. 不同土地利用方式土壤重金属赋存与有机碳关联性分析[J]. *南方农业学报*, 2021, 52(9): 2417-2425.
- [12] 王璐, 王海燕, 何丽鸿, 等. 基于 GIS 的土壤肥力质量综合评价——以天然云冷杉针阔混交林为例[J]. *土壤通报*, 2016, 47(5): 1223-1230.
- [13] 陈颖, 代斌, 高强伟, 等. 蜀南竹海毛竹林土壤化学肥力质量及其评价[J]. *土壤*, 2015, 47(6): 1054-1060.
- [14] 杨媛媛, 陈奇伯, 黎建强, 等. 滇中高原华山松植物多样性与土壤生物肥力特征[J]. *土壤*, 2017, 49(1): 90-96.
- [15] 樊亚男, 姚利鹏, 瞿明凯, 等. 基于产量的稻田肥力质量评价及障碍因子区划——以进贤县为例[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1157-1169.
- [16] 张杰, 金志农, 张海燕, 等. 鼎湖山不同植被类型下土壤肥力质量变化[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(6): 50-57.
- [17] 黄晶, 蒋先军, 曾跃辉, 等. 稻田土壤肥力评价方法及指标研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(6): 1-8.
- [18] 王玉军, 吴同亮, 周东美, 等. 农田土壤重金属污染评价研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(12): 2365-2378.
- [19] 中华人民共和国国土资源部. 多目标区域地球化学调查规范: DZ/T 0258—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [20] 中国地质调查局. 生态地球化学评价样品分析技术要求(试行): DD 2005-03[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [21] 中华人民共和国国土资源部. 土地质量地球化学评价规范: DZ/T 0295—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [22] 曹春霞, 朱升海, 颜越, 等. 有机管理对不同土地利用方式下土壤质量的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(3): 474-482.
- [23] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 水田土壤肥力现状及变化规律分析——以湖北省为例[J]. *土壤学报*, 2012, 49(2): 319-330.
- [24] 张涛. 基于 GIS 的江汉平原土壤养分空间分异及土壤有机碳研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [25] Zhang Y L, Zhang X C, Shi S J, et al. Determining the depth of mixing layer in which soil solute releasing from soil to surface runoff on the unsaturated loess slope under artificial rainfall condition[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(1): 153-165.
- [26] 石兰英, 牟长城, 田新民, 等. 小兴安岭不同沼泽甲烷排放及其影响因子[J]. *生态学报*, 2010, 30(19): 5289-5295.
- [27] 赵光影, 江姗, 邵宗仁. 小兴安岭森林沼泽湿地土地利用变化对土壤活性碳组分的影响[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(6): 68-74.
- [28] 唐薇, 赵志忠, 王军广, 等. 不同耕作制度下稻田土壤有机碳垂直分布季节变化及其影响因素——以海南省定安县为例[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(9): 1932-1938.
- [29] 王振芬. 三江平原湿地不同土地利用方式对土壤养分及酶活性的影响[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 43-48.
- [30] 张永慧, 李贝贝, 张紫妍, 等. 不同土地利用方式对哈尼梯田土壤肥力的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(6): 25-34.
- [31] 罗曼琳, 窦添元, 向秋洁, 等. 重庆农田土壤硫分布特征及其影响因素[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(3): 287-297.
- [32] 胡玉福, 邓良基, 张世熔, 等. 川中丘陵区不同利用方式的土壤养分特征研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 75-78.
- [33] 杜国强, 陈富荣, 邢润华, 等. 皖江经济带耕地土壤养分丰缺地球化学评价及科学施肥研究[J]. *安徽农业科学*, 2022, 50(7): 150-154, 183.
- [34] 王志强, 缪建群, 刘英, 等. 长江中游双季稻田不同轮作方式对土壤质量的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(11): 1703-1714.
- [35] 张鹏, 钟川, 周泉, 等. 不同冬种模式对稻田土壤碳库管理指数的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(8): 1163-1171.
- [36] 赵倩倩, 赵庚星, 姜怀龙, 等. 县域土壤养分空间变异特征及合理采样数研究[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(8): 1382-1391.
- [37] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 7-8.
- [38] 马振东, 张德存, 闭向阳, 等. 武汉沿长江、汉江 Cd 高值带成因初探[J]. *地质通报*, 2005, 24(8): 740-743.
- [39] 段燕, 汪丙国, 王慧敏, 等. 冲积和湖积成因土壤 Cd 的吸附特征: 以安徽省当涂县为例[J]. *地球科学*, 2021, 46(4): 1490-1504.
- [40] Trammell T L E, Schneid B P, Carreiro M M. Forest soils adjacent to urban interstates: Soil physical and chemical properties, heavy metals, disturbance legacies, and relationships with woody vegetation[J]. *Urban Ecosystems*, 2011, 14(4): 525-552.
- [41] 李奕, 陈金萍, 李祥余, 等. 不同农业土地利用方式对土壤重金属含量影响及生态风险评价[J]. *北方园艺*, 2021(18): 95-102.