



稻田有机肥配施的土壤环境效应评价指标体系构建

刘丽媛, 郑向群, 张春雪, 杨波, 陈咄圳, 徐艳

引用本文:

刘丽媛, 郑向群, 张春雪, 等. 稻田有机肥配施的土壤环境效应评价指标体系构建[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 129–138.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0732>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 吕真真, 冀建华, 冯兆滨, 刘秀梅

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 810–819 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0584>

有机肥配施对中国农田土壤容重影响的整合分析

刘丽媛, 徐艳, 朱书豪, 高艺, 郑向群

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 867–873 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0500>

我国不同区域粮食作物产量对有机肥施用的响应差异

任科宇, 徐明岗, 张露, 段英华, 王伯仁

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 143–150 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0150>

猪粪有机肥施用对潮土速效养分含量及团聚体分布的影响

石纹磴, 刘世亮, 赵颖, 高焕平, 王洋洋, 李慧, 刘芳

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 431–438 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0070>

自然降雨条件下不同施肥模式和耕作方式对坡耕地紫色土肥力质量的影响

彭石磊, 何丙辉, 王润泽, 唐柄哲

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 318–326 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0045>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘丽媛, 郑向群, 张春雪, 等. 稻田有机肥配施的土壤环境效应评价指标体系构建[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 129-138.
LIU L Y, ZHENG X Q, ZHANG C X, et al. Construction of the evaluation index system for soil environment of paddy fields with organic fertilizer supplementation[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(1): 129-138.



开放科学 OSID

稻田有机肥配施的土壤环境效应评价指标体系构建

刘丽媛, 郑向群, 张春雪, 杨波, 陈咄圳, 徐艳*

(农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:为构建稻田有机肥配施的土壤环境效应评价指标体系,采用整合分析筛选了稻田有机肥配施的土壤环境敏感因子,进一步通过变异分析、相关分析、主成分分析以及随机森林模型的耦合分析构建了稻田有机肥配施的土壤环境效应评价指标体系。整合分析从43个土壤环境指标中筛选出了26个有机肥配施的土壤环境敏感因子,包括稻田土壤容重(BD)、非毛管孔隙度、团聚体(>5、2~5、1~2、0.5~1、0.25~0.5 mm)、<0.25 mm微团聚体、pH、电导率(EC)、交换性钾离子、有机碳(SOC)、总氮(TN)、总磷(TP)、总钾(TK)、速效氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)、土壤微生物量碳(MBC)、土壤微生物量氮(MBN)、土壤脲酶(SUE)活性、土壤转化酶(SSC)活性、土壤脱氢酶(SDH)活性、锌(Zn)、铜(Cu)、镉(Cd)。对环境敏感因子进行变异分析,筛选出累计贡献率大于85%的环境敏感因子,进一步对筛选到的环境敏感因子进行相关性分析得出因子之间的相关性,通过主成分分析对因子进行分组,通过随机森林分析得出因子重要性,最后通过三者的耦合分析构建了包括BD、pH、EC、SOC、TN、AK、AP、MBC、Cd和Cu等10个指标的稻田有机肥配施的土壤环境效应评价指标体系。本研究为稻田有机肥配施的土壤环境效应评价奠定了基础,为我国土壤环境评价指标体系的构建提供了新思路。

关键词:稻田;有机肥配施;土壤环境;指标体系;环境敏感因子;整合分析

中图分类号:S141;S511

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)01-0129-10

doi: 10.13254/j.jare.2020.0732

Construction of the evaluation index system for soil environment of paddy fields with organic fertilizer supplementation

LIU Liyuan, ZHENG Xiangqun, ZHANG Chunxue, YANG Bo, CHEN Peizhen, XU Yan*

(Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: To develop an evaluation index system for soil environment of paddy fields with combined application of organic fertilizers, the present study employed meta-analysis to selected sensitive factors of the soil environment. The identified factors were used to construct an index system for soil environment of combined application of organic fertilizers in paddy fields through coupling of the variation analysis, correlation analysis, principal component analysis, and random forest. Of 43 soil environment factors, meta-analysis identified 26 sensitive factors: soil bulk density (BD), non-capillary porosity, aggregates (>5, 2~5, 1~2, 0.5~1, and 0.25~0.5 mm), <0.25 mm microaggregates, pH, electrical conductivity (EC), exchangeable potassium ions, organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), available nitrogen (AN), available phosphorus (AP), available potassium (AK), soil microbial biomass carbon (MBC), soil microbial biomass nitrogen (MBN), soil urease (SUE) activity, soil invertase (SSC) activity, soil dehydrogenase (SDH) activity, zinc (Zn), copper (Cu), and cadmium (Cd). The environmental sensitive factors with a cumulative contribution rate greater than 85% were selected by variation analysis. The integrated analysis of the results of the correlation analysis, principal component analysis, and random forest of the selected sensitive factors was utilized to construct the index system for soil environmental effects of combined application of organic

收稿日期:2020-12-10 录用日期:2021-02-04

作者简介:刘丽媛,女,河北衡水人,博士研究生,主要从事化肥减施的环境效应评价研究。E-mail:2586085258@qq.com

*通信作者:徐艳 E-mail:xuyan@aepi.org.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0201200,2016YFD0201201)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2016YFD0201200,2016YFD0201201)

fertilizers in paddy fields. The system was based on BD, pH, EC, SOC, TN, AK, AP, MBC, Cd, and Cu. The results of the present study provide a basis for the evaluation of soil environmental effects of combined organic fertilizer application in paddy fields, and offer a new concept for the construction of a soil environmental assessment index system.

Keywords: paddy field; organic fertilizer application; soil environment; index system; environmental sensitive factors; meta-analysis

化肥施用被认为是最高效的农业增产措施,对保障粮食安全具有重要作用^[1]。然而,过度追求粮食产量造成我国种植业化肥施用量的急剧上升,远远超出作物对化肥的需求量^[2]。水稻是我国重要的粮食作物之一,年平均化肥施用量超800万t,占我国种植业化肥用量的10%以上^[3]。杨万江等^[4]基于长江流域6个水稻主产省份的678份稻田化肥施用数据,通过双对模型和多元线性回归模型分析发现,73.16%的农户化肥施用量均超出最优化施用量。研究表明稻田化肥过量施用造成了严重的土壤环境问题,如土壤酸化和土壤板结等,进而影响水稻产量^[5-6]。黄元财等^[7]的研究表明,当施氮量大于 $190 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时水稻产量会下降。为保证我国农业的可持续发展,2017年和2018年中央一号文件明确要求深入推进化肥零增长行动。因此,创新水稻化肥减施技术具有重要意义。2018年7月,农业农村部印发了《农业绿色发展技术导则(2018—2030年)》,有机肥配施技术则是其中之一。

有机肥的施用在我国具有悠久的历史,而这一做法在农业集约化进程中逐渐消失^[8]。有机肥含有农作物生长发育过程中所需的多种营养元素^[9],大量研究表明有机肥施用能够改善土壤物理状况、提高水肥调控能力^[10-11]、提升土壤肥力^[12],同时促进土壤微生物的生长和繁殖,优化土壤微生物群落组成^[13]。此外,有机肥施用不仅替代化肥的投入,还能提高水稻产量与品质^[14]。然而,有机肥中重金属残留也会随有机肥的施用进入土壤,从而造成稻田土壤环境污染。王开峰等^[15]通过稻田长期定位试验发现,长期施用有机肥提高了土壤中锌(Zn)、铜(Cu)、镉(Cd)和铅(Pb)的含量。因此客观评价稻田有机肥施用对土壤的环境效应十分必要,而在稻田土壤环境质量评价前,需对评价指标进行科学地筛选。

大量研究根据评价需求构建了相应的土壤环境评价指标。如张佳凤^[16]通过相关分析和主成分分析构建了一个包含耕作层深、微团聚体(0.25~0.05、0.05~0.01 mm)、土壤阳离子交换量(CEC)、电导率(EC)、有机质(SOM)、速效钾(AK)、有效磷(AP)、转

化酶(SSC)等9个指标的水田合理耕层指标体系。何蓉等^[17]则通过“压力-状态-响应”模型分别构建了田块和区域尺度化肥农药减施增效的土壤环境效应指标体系。辛芸娜等^[18]通过“指标-过程-功能-需求”这一理论框架,构建了北京市大兴区耕地多功能评价指标体系。然而,稻田有机肥配施的土壤环境效应指标体系鲜见报道。鉴于此,本研究通过整合分析、变异分析、相关性分析、主成分分析以及随机森林模型综合分析,构建了稻田有机肥配施的土壤环境效应评价指标体系,以期为稻田有机肥配施的土壤环境效应提供评价依据。

1 指标体系构建的原则与思路

1.1 指标体系构建的原则

由于有机肥配施会影响到稻田土壤物理、化学、生物学的性质及土壤重金属含量等多个方面,因此,在选择评价指标时应考虑指标是否具有代表性,并且可以从多个方面综合反映有机肥配施的土壤环境效应。因此,稻田有机肥配施的土壤环境效应评价指标体系的构建应遵循以下原则^[19]:

(1)最小数据集原则:水稻有机肥配施所引发的土壤环境效应涉及诸多方面,因此,选择评价指标时应考虑全面性;同时,应保持各指标涵盖信息的相对独立性,降低信息的冗余程度,以尽可能少的指标来反映稻田有机肥配施的实际土壤环境效应。

(2)易获取原则:所选土壤环境评价指标应易于检测或成本可行,尽量选择已纳入国家土壤环境监测系统的指标。由于目前抗生素和微生物等的检测成本较高,因此本研究未将抗生素和微生物纳入到指标体系中。

(3)灵敏性原则:有机肥配施对稻田土壤环境的影响是一个相对缓慢变化的过程,应优先选择受有机肥配施影响大、改变快的土壤环境指标,尽量避免选择需要长期监测且变化不明显的土壤环境指标。

(4)主导性原则:稻田有机肥配施的土壤环境效应涵盖面广,其中涉及到很多指标,其中起主导作用和具协变性的因子对稻田土壤环境起关键作用,因

此,应尽量选择此类环境因子。

1.2 指标体系构建的思路

本研究构建稻田有机肥配施的土壤环境效应评价指标体系的基本思路如图1所示。

(1)通过文献查阅,收集有机肥配施条件下,稻田土壤物理、土壤化学、土壤生物学以及土壤重金属数据,通过整合分析筛选土壤环境敏感因子。

(2)对筛选到的土壤环境敏感因子进行变异分析,并计算各因子的贡献率,选择累计贡献率大于

85%^[20]的因子进行下一步分析。

(3)对累计贡献率大于85%的因子进行皮尔逊相关性分析获得因子的相关性,运用主成分分析对环境敏感因子分组,运用随机森林模型计算各环境敏感因子的重要值,最终根据以上分析综合筛选出稻田有机肥配施的土壤环境效应评价指标体系。

2 数据来源与分析方法

2.1 数据来源

在Web of Science、Science Direct、Springer Link和中国知识资源综合数据库(CNKI)等数据库进行文献筛选,流程如图2所示。首先,通过设置有机肥配施(或有机肥替代)、水稻、土壤(或土壤物理、土壤化学、土壤生物学、土壤重金属)等关键词,筛选稻田有机肥配施对土壤环境影响的相关文献,初步筛选到相关文献1 520篇,删除重复文献后剩余文献1 260篇。进一步通过题目、关键词和摘要进行筛选,剔除文献918篇,剩余文献342篇。此外,文献需满足以下条件:①研究必须在大田进行,而不是在盆栽或温室;②必须同时具有对照组(仅施用化肥)和处理组(配施有机肥);③必须具有均值、标准差(*SD*)和样本量(*n*),如果论文中提供了标准误差(*SE*),则使用以下方法计算*SD*:

$$SD=SE\times\sqrt{n} \quad (1)$$

对全文进行评估,剔除存在非大田实验、实验方法不明确和数据缺失等问题的文献205篇,最终纳入到整合分析中的文献共计137篇。

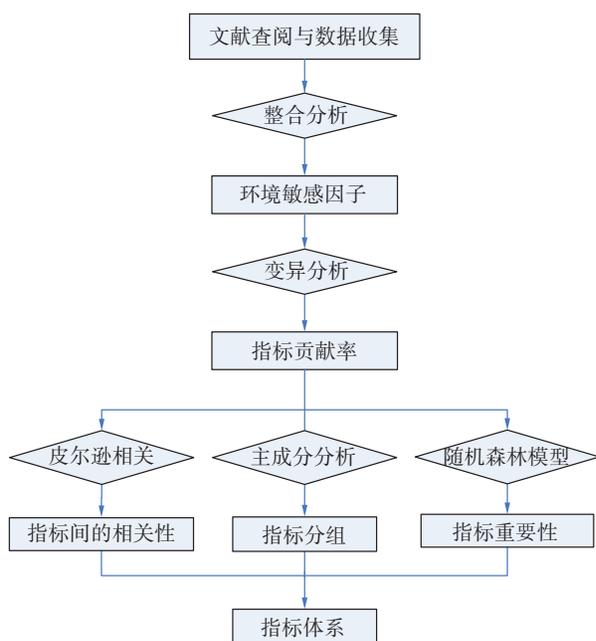


图1 指标体系构建流程图

Figure 1 Flow chart of index system construction

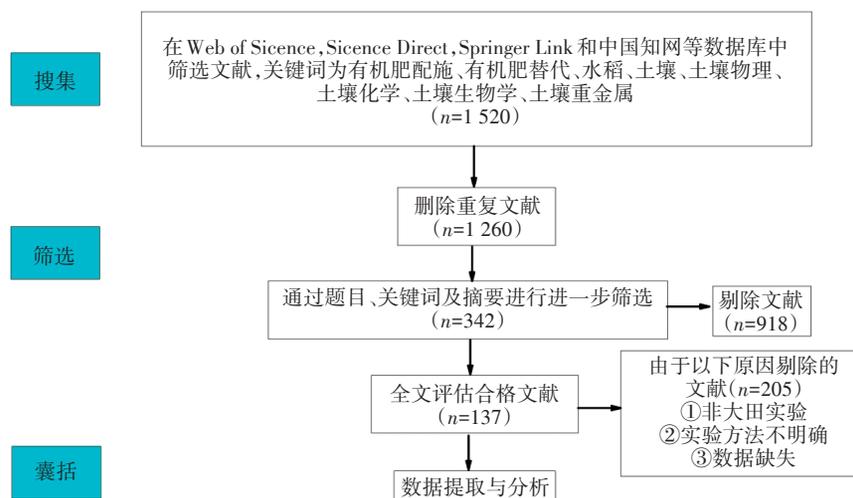


图2 文献筛选流程

Figure 2 Flow chart of literature screening

筛选后文献主要涉及亚热带气候、温带大陆性季风气候和大陆性干旱气候三种气候区,砂土、壤土和黏土三种土壤质地,以及动物粪肥、作物秸秆、生物炭和生物肥料等四种有机肥类型,各分类水平包含的数据量如表1所示。

对于筛选的文献记录如下指标:①11个土壤物理性质指标,包括土壤容重(BD)、土粒密度、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、<0.25 mm微团聚体含量、0.25~0.5 mm团聚体含量、0.5~1 mm团聚体含量、1~2 mm团聚体含量、2~5 mm团聚体含量、>5 mm团聚体含量;②16个土壤化学性质指标,包括pH、EC、CEC、氧化还原电位(Eh)、盐基饱和度(BS)、交换性镁、交换性钙、交换性钠、交换性钾、有机碳(SOC)、总氮(TN)、总磷(TP)、总钾(TK)、速效氮(AN)、AP、AK;③10个土壤生物学性质指标,包括微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)、微生物量磷(MBP)、土壤呼吸、代谢熵、脲酶(SUE)活性、SSC活性、磷酸酶(SPA)活性、脱氢酶(SDH)活性、纤维素酶(SCL)活性;④6个土壤重金属指标,包括镉(Cd)、铬(Cr)、锌(Zn)、铜(Cu)、汞(Hg)、铅(Pb)。若文献以图片呈现实验结果,采用Get Data Graph Digitizer 2.24对图片数据进行数字化;若文献中提供SOM,则通过公式(2)计算SOC^[21]:

$$C_{soc} = C_{som} \times 0.58 \quad (2)$$

2.2 分析方法

2.2.1 整合分析

本研究采用整合分析对稻田有机肥配施的土壤环境指标进行敏感性分析。整合分析中运用权重响应比(RR_{++})评估指标的敏感度。响应比(RR)是用于评估有机肥配施对某一指标影响程度的指标^[22]。对于给定指标, RR 的定义为处理组(配施有机肥)与对照组(仅施用化肥)的平均值之比,其计算公式如下:

$$RR = \frac{M_t}{M_c} \quad (3)$$

式中: M_t 和 M_c 分别代表处理组和对照组的平均值。

$\ln RR$ 是 RR 的自然对数,对于某一指标,若 $\ln RR > 0$,表明有机肥配施对该指标的作用为正;若 $\ln RR < 0$,则表明有机肥配施对该指标的影响为负。

$$\ln RR = \ln \frac{M_t}{M_c} = \ln M_t - \ln M_c \quad (4)$$

方差(V)通过以下公式计算:

$$V = \frac{SD_t^2}{n_t M_t^2} + \frac{SD_c^2}{n_c M_c^2} \quad (5)$$

式中: n_t 和 n_c 分别代表处理组(配施有机肥)和对照组(仅施用化肥)的样本量, SD_t 和 SD_c 分别代表处理组(配施有机肥)和对照组(仅施用化肥)的 SD 值。此外,加权因子(W_{ij})、加权响应比(RR_{++})、 RR_{++} 的标准误 $[S(RR_{++})]$ 和95%置信区间(95%CI)的计算方法如下:

$$W_{ij} = \frac{1}{V} \quad (6)$$

$$RR_{++} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} W_{ij} \ln RR}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} W_{ij}} \times 100\% \quad (7)$$

$$S(RR_{++}) = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} W_{ij}}} \quad (8)$$

$$95\%CI = RR_{++} \pm 1.96 \times S(RR_{++}) \quad (9)$$

式中: m 为分组数; k_i 为第 i 组的总比较对数; j 为第 i 组总比较对数(k_i)中的第 j 对。若给定指标的95%CI值不包含零点,表明该指标在处理组和对照组之间具有显著差异($P < 0.05$)^[21],则称之为有机肥配施引起的土壤环境敏感因子。

2.2.2 变异分析

指标贡献率指的是指标对总体评价目标的贡献程度。本研究采用变异系数计算指标的贡献率,指标的贡献率越高反映出的信息越多^[23]。某一指标变异系数 C_j 即为该指标的标准差与均值的比值,反映了同一指标相对不同研究对象的离散程度的大小。指标的变异系数计算公式如下:

$$C_j = \sqrt{\frac{(n-1)^{-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - n^{-1} \sum_{i=1}^n x_{ij})^2}{n^{-1} \sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (10)$$

前 l 个指标的累计贡献率为变异系数较大的前 l 个指标的变异系数之和占所有指标变异系数之和的

表1 有机肥配施对稻田土壤环境效应影响数据库样本数量分布

Table 1 Sample numbers for the meta-analysis of soil environment of paddy field with organic fertilizer supplementation

气候特征 Climate			土壤质地 Soil texture			有机肥类型 Organic fertilizers type			
亚热带气候区	温带大陆性季风气候区	大陆性干旱气候区	砂土	壤土	黏土	粪肥	秸秆	生物炭	生物肥料
93	28	16	48	53	36	47	40	23	27

比例,即:

$$g_l = \frac{\sum_{j=1}^l C_j'}{\sum_{j=1}^m C_j} \times 100\% \quad (11)$$

式中: g_l 表示前 l 个变量的累计贡献率; C_j' 为变异系数较大的前 l 个指标的变异系数; C_j 为所有指标的变异系数; m 为指标量。

$$g_l \geq g_0 \geq g_{l-1} \quad (12)$$

式中: g_0 表示设定的累计贡献率,本研究设定累计贡献率大于等于85%,即 $g_0=85%$,对指标进行筛选,保留变异系数较大的前 l 个指标。

2.2.3 皮尔逊相关性分析

本研究采用皮尔逊相关性分析计算土壤环境指标之间的相关性。土壤环境指标之间的相关系数越高,说明这些指标反映的土壤环境信息的相关性也越强。第 x 项指标与第 y 项指标之间的相关系数(r)计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (13)$$

式中: x_i 和 y_i 表示第 i 组的 x 值和 y 值; \bar{x} 和 \bar{y} 为 x 和 y 的平均值; n 表示组数。

2.2.4 主成分分析

本研究采用主成分分析法对稻田有机肥配施的土壤环境效应指标进行分组,实现土壤环境指标的降维,从而筛选出相对独立且能够反映土壤环境总体信息的指标。本研究将主成分中因子载荷绝对值大于或等于0.5的土壤环境指标分为一个组,若某个土壤环境指标在两个主成分中均出现载荷大于或等于0.5时,则把该土壤环境指标划分到与其他土壤环境指标相关性较低的那一组^[24]。

2.2.5 随机森林模型

本研究采用随机森林模型解决土壤环境指标的重要性问题^[25]。首先,利用自助重复抽样法从原始数据集中随机抽取 M 个训练集,每个训练集的数据量约为原始数据集的2/3;其次,对 M 个训练集分别构建分类树,产生分类树 m 棵,进一步组成随机森林。而每次抽样过程中未被抽中的1/3数据集为袋外数据^[26]。首先,根据袋外数据计算随机森林中每个分类树的袋外误差(E_i);然后,随机改变袋外数据某一特征变量的值,并计算新的袋外误差(E_j);最后,根据下式计算

变量 x 的重要性 $I(x)$:

$$I(x) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (E_j - E_i) \quad (14)$$

3 结果与分析

3.1 土壤环境敏感因子筛选

3.1.1 土壤物理性质

稻田土壤物理性质对有机肥配施的响应如图3a所示。有机肥配施显著降低了BD、<0.25 mm微团聚体和>5 mm团聚体含量,降幅(95%CI)分别为4.24%(3.01%~5.55%)、11.70%(4.30%~19.10%)和7.78%(2.28%~13.28%);有机肥配施显著提高了非毛管孔隙度、2~5 mm团聚体、1~2 mm团聚体、0.5~1 mm团聚体含量和0.25~0.5 mm团聚体含量,增幅(95%CI)分别为49.22%(42.32%~56.13%)、12.77%(9.27%~16.26%)、11.04%(3.84%~18.24%)、19.33%(10.83%~27.83%)和46.46%(39.76%~53.16%);而有机肥配施对稻田土壤土粒密度(95%CI: -16.55%~0.84%)、总孔隙度(95%CI: -1.04%~13.75%)和毛管孔隙度(95%CI: -1.48%~7.71%)的影响并不显著。综上,筛选出土壤物理性质中的敏感因子为BD、非毛管孔隙度、>5 mm团聚体、2~5 mm团聚体、1~2 mm团聚体、0.5~1 mm团聚体、0.25~0.5 mm团聚体和<0.25 mm微团聚体。

3.1.2 土壤化学性质

有机肥配施对稻田化学性质的影响如图3b所示。有机肥配施显著提高了稻田土壤pH、EC、土壤交换性钾离子和SOC含量,增幅(95%CI)分别为4.86%(3.74%~5.98%)、4.76%(2.30%~7.22%)、15.05%(7.51%~22.59%)和17.70%(14.56%~20.84%)。土壤全量养分和速效养分对有机肥配施的响应并不一致。就全量养分而言,土壤TN、TP和TK分别显著提高了10.50%(95%CI: 8.14%~12.86%)、2.16%(95%CI: 1.32%~3.0%)和3.22%(95%CI: 2.28%~4.16%)。而AN、AP和AK的提高幅度分别为22.37%(95%CI: 18.17%~26.57%)、2.70%(95%CI: 0.74%~6.14%)和6.77%(95%CI: 5.37%~8.21%)。而有机肥配施对稻田土壤Eh(95%CI: -4.41%~10.95%)、BS(90%CI: -8.06%~-0.40%)、CEC(95%CI: -1.12%~11.34%)、交换性镁(95%CI: -15.08%~1.56%)、交换性钙(95%CI: -1.88%~10.98%)、交换性钠(-1.02%~9.78%)均无显著影响。综上,筛选出土壤化学性质中的敏感因子为pH、EC、交换性钾离子、SOC、TN、TP、TK、AN、

AP、AK。

3.1.3 土壤生物学性质

稻田土壤生物学性质对有机肥配施的响应如图3c所示。由图3c可知,有机肥配施显著提高了土壤MBC含量、MBN含量、SUE活性、SSC活性和SDH活性,增幅(95%CI)分别为19.02%(9.79%~28.25%)、11.15%(1.92%~20.3%)、5.92%(1.49%~10.35%)、7.07%(1.37%~12.77%)和4.81%(1.61%~8.01%)。然而,有机肥配施对MBP(95%CI: -1.01%~9.48%)、土壤呼吸(95%CI: -3.0%~15.34%)、土壤代谢熵(95%CI: -13.25%~5.21%)、SPA(95%CI: -6.92%~1.55%)和SCL(95%CI: -0.6%~7.82%)的影响并不显著。综上,土壤生物学性质中的环境敏感因子为MBC、MBN、SUE、SSC和SDH。

3.1.4 稻田土壤重金属

有机肥对稻田土壤重金属的影响如图3d所示。

有机肥配施显著提高了稻田土壤Zn、Cu和Cd的含量,增幅(95%CI)分别为6.7%(3.2%~10.2%)、18.7%(9.2%~28.2%)和8.3%(4.6%~12%)。而有机肥配施对土壤Cr(95%CI: -1.1%~8.7%)、Hg(95%CI: -0.4%~1.6%)和Pb(95%CI: -1.2%~5.8%)的影响并不显著。综上,经过整合分析筛选的土壤重金属中的敏感因子为Zn、Cu和Cd。

综上,通过整合分析在43个指标中筛选到26个环境敏感因子,如表2所示。包括BD等8个土壤物理指标、pH等10个土壤化学指标、MBC等5个生物学指标、Zn等3个土壤重金属指标。

3.2 指标体系筛选

3.2.1 环境敏感因子贡献率

各环境敏感因子的变异系数、贡献率及累计贡献率如表3所示。前18个土壤环境敏感因子的贡献率达到了87.87%,满足了累计贡献率大于等于85%的

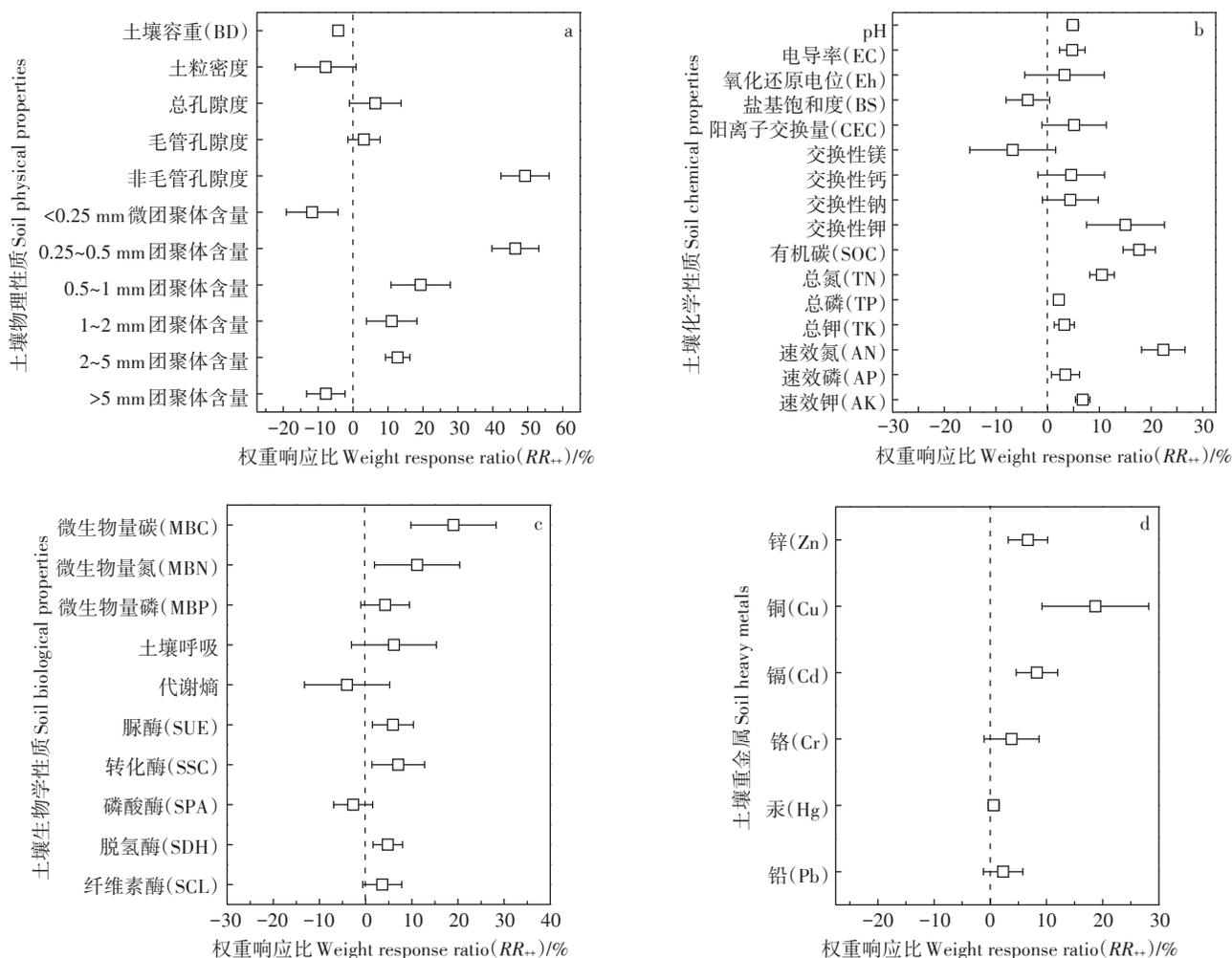


图3 土壤环境指标对有机肥配施的响应

Figure 3 The response of soil environmental indicators to organic fertilizers supplementation

表2 稻田有机肥配施的土壤环境敏感因子

Table 2 Soil environmental sensitive factors of paddy field with organic fertilizer supplementation

分类 Category	指标 Index
土壤物理性质	BD、非毛管孔隙度、>5 mm 团聚体、2~5 mm 团聚体、1~2 mm 团聚体、0.5~1 mm 团聚体、0.25~0.5 mm 团聚体、<0.25 mm 微团聚体
土壤化学性质	pH、EC、交换性钾离子、SOC、TN、TP、TK、AN、AP、AK
土壤生物学性质	MBC、MBN、SUE、SSC、SDH
土壤重金属	Zn、Cu、Cd

筛选要求。因此,选择保留包括TN在内的以上全部土壤环境敏感因子,剔除<0.25 mm微团聚体、交换性钾离子、>5 mm团聚体、TP、TK、0.25~0.5 mm团聚体、0.5~1 mm团聚体和非毛管孔隙度。指标贡献率筛选后,保留BD、AK、AP、SUE、SDH、1~2 mm团聚体、2~5 mm团聚体、Cd、SOC、Cu、AN、MBN、MBC、pH、Zn、SSC、EC和TN共18个指标。

表3 环境敏感因子的变异系数、贡献率及累计贡献率

Table 3 Coefficient of variation, contribution rate and cumulative contribution rate for each soil environmental sensitive factor

指标 Index	变异系数 Coefficient of variation	贡献率 Contribution rate/%	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%
BD	0.247 3	6.95	6.95
AK	0.245 1	6.89	13.84
AP	0.225 7	6.35	20.19
SUE	0.220 0	6.19	26.38
SDH	0.207 1	5.82	32.20
1~2 mm 团聚体	0.205 2	5.77	37.97
2~5 mm 团聚体	0.197 1	5.54	43.51
Cd	0.182 3	5.13	48.64
SOC	0.180 4	5.07	53.71
Cu	0.178 2	5.01	58.72
AN	0.151 4	4.26	62.98
MBN	0.140 2	3.94	66.92
MBC	0.137 6	3.87	70.79
pH	0.137 2	3.86	74.65
Zn	0.132 3	3.72	78.37
SSC	0.116 9	3.29	81.66
EC	0.112 1	3.15	84.81
TN	0.109 0	3.06	87.87
<0.25 mm 微团聚体	0.088 1	2.48	90.35
交换性钾离子	0.081 3	2.29	92.64
>5 mm 团聚体	0.073 4	2.06	94.70
TP	0.053 2	1.50	96.20
TK	0.049 9	1.40	97.60
0.25~0.5 mm 团聚体	0.038 8	1.09	98.69
0.5~1 mm 团聚体	0.032 0	0.90	99.59
非毛管孔隙度	0.014 3	0.41	100.00

3.2.2 环境敏感因子相关性

土壤环境是由土壤物理性质、化学性质、生物学性质和土壤重金属等共同作用的结果,所以各指标之间必然存在一定的相关关系。由图4中稻田土壤物理性质、化学性质、生物学性质和土壤重金属之间的相关性分析结果可知,BD与1~2 mm团聚体、2~5 mm团聚体显著相关;SUE活性与SOC、AN、MBC和TN显著相关;SDH活性与SOC、SSC活性显著相关;1~2 mm团聚体与2~5 mm团聚体显著相关($P<0.05$);Cd与SOC、Cu、Zn和EC显著相关;SOC与Cu、AN、MBN、MBC和SSC显著相关($P<0.05$);Cu与Zn、SSC和TN显著相关($P<0.05$);AN与MBN、MBC和TN显著相关;MBN与MBC和TN显著相关;MBC与pH、SSC和TN显著相关;pH与SSC和TN显著相关;SSC与TN显著相关。

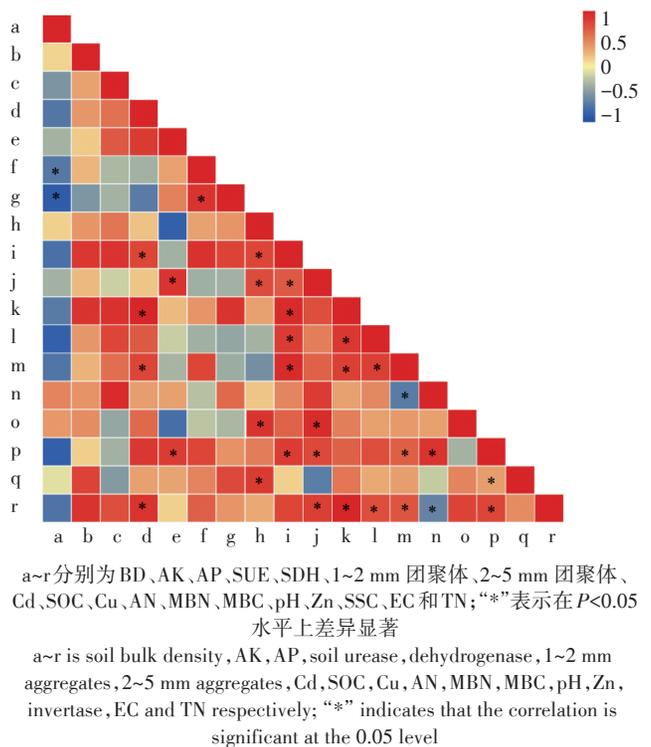


图4 水稻有机肥配施的土壤环境指标相关性分析
Figure 4 Correlation analysis of soil environmental index of paddy field with organic fertilizer supplementation

3.2.3 环境敏感因子分类

根据分组原则,本研究将BD等18个环境敏感因子分为4组,如表4所示。其中第一组为BD、SUE活性、SDH活性、1~2 mm团聚体、2~5 mm团聚体、SOC、AN、MBN、SSC活性、EC和TN;第二组为AK、Cd、MBC和Zn;第三组为AP和Cu;第四组为pH。

3.2.4 环境敏感因子重要值

通过随机森林模型分析得出18个稻田土壤环境敏感因子的重要值,如表5所示。第一组中各土壤环境敏感因子的重要值表现为SOC>BD>TN>SSC活性>2~5 mm团聚体>SDH活性>1~2 mm团聚体>AN>MBN>SUE活性>EC。第二组重要值由大到小为MBC>AK>Zn>Cd,第三组的重要值表现为AP>Cu,而第四组仅有一个环境敏感因子pH,其重要值为0.267。

3.3 指标体系构建

通过随机森林分析得出第一组中重要值最大的指标为SOC,而SOC与SDH活性、SUE活性、SSC活性、MBN显著相关,因此剔除与之相关的指标,仅保留SOC。第一组剩余环境敏感因子中BD的重要值最高,因此剔除与其显著相关的1~2 mm团聚体和2~5 mm团聚体。同理,剔除与TN显著相关的AN。最终

第一组中保留SOC、BD、TN和EC。第二组中Cd与Zn显著相关,且Cd的重要值高于Zn,因此剔除Zn,仅保留Cd进入指标体系,此外AK与MBC无显著相关性,因此二者均进入指标体系,最终第二组保留Cd、AK和MBC。第三组为AP和Cu,且二者无显著相关性,因此AP和Cu均进入指标体系。第四组中仅含pH一个指标,因此第四组保留pH。综上,最终构建了包含BD等10个指标的稻田有机肥配施的环境效应评价指标体系,如表6所示。

4 讨论

土壤环境效应评价指标的科学性和合理性一直是科学工作者关注的重要问题,是进行土壤环境效应评价的基础。土壤环境效应评价体系的科学性与合理性主要体现在以下两个方面:①指标应反映土壤环境的真实状况。土壤环境涉及土壤物理、化学、生物学及土壤重金属等多个方面^[27],因此,土壤环境评价指标体系应反映土壤的综合性质。此外,土壤物理、化学、生物学性质及土壤重金属均包含多个指标,因此,选取指标应具有代表性;②指标获取可行性。指标体系中包含的指标应具有易获取性,所选土壤环境评价指标应易于检测或成本可行^[28],而不易获得的指

表4 稻田有机肥配施的土壤环境指标分类

Table 4 Classification of soil environmental index of paddy field with organic fertilizer supplementation

指标 Index	主成分 Principal component				分组 Category
	1	2	3	4	
BD	-0.947	-0.120	0.059	-0.293	1
AK	0.524	0.713	-0.440	-0.153	2
AP	0.305	-0.109	0.577	-0.083	3
SUE	0.837	0.465	0.136	-0.254	1
SDH	-0.982	0.025	-0.155	-0.102	1
1~2 mm 团聚体	0.943	0.090	0.277	-0.163	1
2~5 mm 团聚体	0.971	-0.231	0.044	-0.039	1
Cd	0.172	0.973	-0.116	-0.100	2
SOC	0.903	-0.085	-0.220	0.358	1
Cu	0.060	-0.04	0.840	0.28	3
AN	0.950	0.073	0.301	0.036	1
MBN	0.891	-0.292	0.319	-0.137	1
MBC	0.678	-0.712	0.133	-0.127	2
pH	-0.738	0.078	0.088	0.664	4
Zn	0.040	0.928	-0.318	0.192	2
SSC	0.974	0.040	0.161	0.155	1
EC	0.648	0.418	-0.157	0.317	1
TN	0.941	0.080	0.320	-0.075	1

表5 稻田有机肥配施的土壤环境敏感因子重要值

Table 5 The important value of soil environmental index of paddy field with organic fertilizer supplementation

指标 Index	重要值 Important value
BD	0.050 0
AK	0.006 7
AP	0.008 3
SUE	0.008 3
SDH	0.033 3
1~2 mm 团聚体	0.030 0
2~5 mm 团聚体	0.035 0
Cd	0.003 2
SOC	0.061 7
Cu	0.001 2
AN	0.020 0
MBN	0.015 0
MBC	0.030 0
pH	0.026 7
Zn	0.003 3
SSC	0.038 3
EC	0.006 7
TN	0.043 3

表6 稻田有机肥配施的土壤环境效应评价指标体系
Table 6 Evaluation index system for soil environment of paddy field with organic fertilizer supplementation

分类 Category	指标 Index	单位 Unit
土壤物理性质	BD	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
土壤化学性质	pH	—
	EC	$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$
	SOC	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
	TN	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
	AK	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
	AP	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
土壤生物学性质	MBC	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
土壤重金属	Cd	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
	Cu	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

标应尽量避免纳入指标体系中。

基于科学性与合理性原则,本研究构建了有机肥配施的稻田土壤环境效应评价指标体系。通过与先前研究结果对比分析发现,本研究构建的土壤环境效应评价指标体系与前人构建的指标体系具有一定的相似性。例如,王溢璟等^[29]通过层次分析法构建的土壤环境评价体系也包括土壤有机质、土壤总氮等指标。此外,郑琦^[30]通过综合因子分析法和特尔斐专家打分法构建了新疆绿洲棉田长期连作土壤环境评价指标,其中也包括土壤pH、SOC、TN、AP等指标,表明本研究构建的土壤环境效应评价指标具有一定的合理性。而部分土壤环境效应评价指标体系未涉及土壤重金属指标,例如,张佳凤^[16]通过相关性分析和主成分分析构建的水田合理耕层指标体系中未涉及任何一种重金属指标。本研究考虑到施用有机肥料会将其中的重金属引入到土壤中,因此本研究将土壤重金属纳入到评价指标体系中,使评价指标体系更加全面。

尽管本研究从多个角度,通过综合分析构建了稻田有机肥配施的土壤环境效应评价指标体系,但该指标体系仍然存在一些不足,主要表现在以下两个方面:①按照指标体系的构建原则,本研究主要选择易获取的土壤环境效应指标,而没有选用较难获取或者在实际测定过程中成本较高的指标。由于有机肥施用会引入抗生素,但目前抗生素检测难度大,属不易获取指标,因此本研究并未将其纳入到指标体系中,在一定程度上会影响评价结果;②本研究通过整合分析进行敏感因子筛选,但整合分析结果与纳入分析的文献密切相关,且由于发表偏倚的存在,分析结果可能存在一定的误差。

5 结论

(1)通过整合分析筛选了包括BD等8个土壤物理指标、pH等10个土壤化学指标、MBC等5个生物学指标和Zn等3个土壤重金属指标,共计26个土壤环境指标的稻田有机肥配施的土壤环境敏感因子。

(2)进一步通过变异分析、相关性分析、主成分分析以及随机森林模型耦合分析,构建了包含BD、pH、EC、SOC、TN、AK、AP、MBC、Cd和Cu等10个指标的稻田有机肥配施的土壤环境效应评价指标体系。

本研究为稻田有机肥配施的土壤环境效应评价提供了依据,为我国土壤环境评价指标体系的构建提供了新思路。

参考文献:

- [1] 白由路. 高效施肥技术研究的现状与展望[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2116-2125. BAI Y L. The situation and prospect of research on efficient fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(11): 2116-2125.
- [2] 周静, 胡芹远, 章力干, 等. 从供给侧改革思考我国肥料和土壤调理剂产业现状、问题与发展对策[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(10): 1103-1110. ZHOU J, HU Q Y, ZHANG L G, et al. Key scientific problems and development countermeasures of fertilizer industry based on agricultural supply-side reform[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Science*, 2017, 32(10): 1103-1110.
- [3] 徐洋, 杨帆, 张卫峰, 等. 2014—2016年我国种植业化肥施用状况及问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(1): 11-21. XU Y, YANG F, ZHANG W F, et al. Status and problems of chemical fertilizer application in crop plantations of China from 2014 to 2016[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(1): 11-21.
- [4] 杨万江, 李琪. 稻农化肥减量施用行为的影响因素[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2017, 16(3): 58-66. YANG W J, LI Q. The impact on less use of chemical fertilizer[J]. *Journal of South China Agricultural University(Social Science Edition)*, 2017, 16(3): 58-66.
- [5] 袁迎春, 邹伟, 郭红艳, 等. 紫云英翻压还田条件下化肥减量对稻田土壤养分及水稻产量性状的影响[J]. 天津农业科学, 2019, 25(12): 28-32. YUAN Y C, ZOU W, GUO H Y, et al. Effects of chemical fertilizer reduction on soil nutrients and rice yield characteristics under the condition of overturning *Astragalus sinicus* L. green manure to the field[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2019, 25(12): 28-32.
- [6] 苗茜, 黄琼, 朱小莉, 等. 有机肥等氮替代化肥对稻田CH₄和N₂O排放的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(4): 740-747. MIAO X, HUANG Q, ZHU X L, et al. Effects of partial organic substitution for chemical fertilizer on CH₄ and N₂O emissions in paddy field[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(4): 740-747.
- [7] 黄元财, 王伯伦, 王术, 等. 施氮量对水稻产量和品质的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2006(5): 688-692. HUANG Y C, WANG B L, WANG S, et al. Effect of amount of N-applied on grain yield and quality of rice[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2006(5): 688-692.

- [8] CUI Z, ZHANG H, CHEN X, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers[J]. *Nature*, 2018, 555:363-366.
- [9] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(1):175-181. NING C C, WANG J W, CAI K Z. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: A Review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(1):175-181.
- [10] 邓超, 毕利东, 秦江涛, 等. 长期施肥下土壤性质变化及其对微生物生物量的影响[J]. *土壤*, 2013, 45(5):888-893. DENG C, BI L D, QIN J T, et al. Effects of long-term fertilization on soil property changes and soil microbial biomass[J]. *Soil*, 2013, 45(5):888-893.
- [11] XIE Z, SHUXIN T, FAROOQ S, et al. Substitution of fertilizer-N by green manure improves the sustainability of yield in double-rice cropping system in south China[J]. *Field Crops Research*, 2016, 188:142-149.
- [12] HUANG S, RUI W Y, PENG X X, et al. Organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a subtropical paddy soil[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 86(1):153-160.
- [13] TIMO K, CRISTINA L F, FRANK E. Abundance and biodiversity of soil microarthropods as influenced by different types of organic manure in a long-term field experiment in central Spain[J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 33(3):278-285.
- [14] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 湖北省早、中、晚稻施氮增产效应及氮肥利用率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3):545-553. WANG W N, LU J W, LU M X, et al. Effect of nitrogen fertilizer application and nitrogen use efficiency of early, middle and late rice in Hubei Province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3):545-553.
- [15] 王开峰, 彭娜, 王凯荣, 等. 长期施用有机肥对稻田土壤重金属含量及其有效性的影响[J]. *水土保持学报*, 2008(1):105-108. WANG K F, PENG N, WANG K R, et al. Effects of long-term manure fertilization on heavy metal content and its availability in paddy soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008(1):105-108.
- [16] 张佳凤. 水田合理耕层指标体系构建及评价方法研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019. ZHANG J F. Study on construction and evaluation method of rational tillage index system in paddy field[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [17] 何蓉, 邵超峰. 基于“压力-状态-响应”模型的化肥农药减施增效环境效应监测指标体系研究[J]. *环境污染与防治*, 2020, 42(2):244-248. HE R, SHAO C F. Study on index system for environmental effects monitoring of chemical fertilizers and pesticides dosage reduction and efficiency improvement based on “pressure-state-response” model[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2020, 42(2):244-248.
- [18] 辛芸娜, 孔祥斌, 鄢文聚. 北京大都市边缘区耕地多功能评价指标体系构建——以大兴区为例[J]. *中国土地科学*, 2017, 31(8):77-87. XIN Y N, KONG X B, YUN W J. Design and application of multi-functional evaluation index system for cultivated land in metropolitan fringe of Beijing: A case study in Daxing District[J]. *China Land Science*, 2017, 31(8):77-87.
- [19] 李晓, 黄琬云, 侯佳均, 等. 地下水污染指示性因子指标体系构建[J]. *地质灾害与环境*, 2019, 30(4):99-102. LI X, HUANG W Y, HOU J J, et al. Construction of indicator system of groundwater pollution[J]. 2019, 30(4):99-102.
- [20] 徐新华. 宁夏贺兰县生态灌区健康指标构建与评价研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020. XU X H. Health index screening and evaluation in Helan County, Ningxia[J]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2020.
- [21] 蔡岸冬, 张文菊, 杨晶晶, 等. 基于 Meta-Analysis 研究施肥对中国农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(15):2995-3004. CAI A D, ZHANG W J, YANG P P, et al. Effect degree of fertilization practices on soil organic carbon and fraction of croplands in China: Based on meta-analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(15):2995-3004.
- [22] HEDGES L V, GUREVITCH J, CURTIS P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. *Ecology*, 1999, 80:1150-1156.
- [23] 梅浩, 余宇晨, 陆翔. 基于小班尺度的生态公益林质量评价指标筛选研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(11):14-22. MEI H, SHE Y C, LU X. Study on the quality assessment index selection of ecological public-welfare forests based on subcompartment scale[J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2019, 39(11):14-22.
- [24] 李桂林, 陈杰, 孙志英, 等. 基于土壤特征和土地利用变化的土壤质量评价最小数据集确定[J]. *生态学报*, 2007, 27(7):2715-2724. LI G L, CHEN J, SUN Z Y, et al. Establishing a minimum data set for soil quality assessment based on soil properties and land use change[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7):2715-2724.
- [25] 刘斌, 郭星, 朱宇恩. 基于随机森林模型的土壤重金属源解析: 以晋中盆地为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(1):106-111. LIU B, GUO X, ZHU Y E. Analysis of soil heavy metal sources in Jinzhong basin based on random forest model[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(1):106-111.
- [26] 马玥, 姜琦刚, 孟治国, 等. 基于随机森林算法的农耕地土地利用分类研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(1):297-303. MA Y, JIANG Q G, MENG Z G, et al. Classification of land use in farming area based on random forest algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1):297-303.
- [27] 李润林, 姚艳敏, 鹏钦. 农产品产地土壤环境质量评价研究进展[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(6):296-300. LI R L, YAO Y M, PENG Q. Research progress on evaluation of soil environmental quality in agricultural production area[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(6):296-300.
- [28] 陈正发. 云南坡耕地质量评价及土壤侵蚀/干旱的影响机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019. CHEN Z F. Quality evaluation of slope farmland in Yunnan Province and soil erosion/drought influencing mechanism[D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [29] 王溢璟, 巴建文, 毕建龙. 层次分析法在土壤环境评价中的应用评价[J]. *地下水*, 2011, 33(6):73-75. WANG Y J, BA J W, BI J L. The application of analytic hierarchy process on soil environmental assessment[J]. *Ground Water*, 2011, 33(6):73-75.
- [30] 郑琦. 新疆绿洲棉田土壤环境质量综合评价研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2018. ZHENG Q. Comprehensive evaluation of soil environmental quality of cotton field in Xinjiang oasis[J]. Shihezi: Shihezi University, 2018.