

基于多元线性回归的东北风沙土耕层土壤质量评价

钟鑫, 乔云发*, 赵红飞, 高雅晓玲, 姚婷 (南京信息工程大学, 江苏南京 210044)

摘要 [目的]采用耕作指数(TI)定量评价东北风沙土区农田耕层土壤质量,为准确评价东北风沙土区耕层土壤质量提供科学依据。[方法]以黑龙江省大庆市杜尔伯特蒙古族自治县域内风沙土区玉米田块为调查对象,依据土壤肥力差异,选取18个调查点进行28项常规土壤理化性状指标和玉米产量的测量。采用多元线性回归方法建立耕层质量评价最小数据集(MDS),计算土壤耕作指数(TI)。[结果]多元回归结果表明,土壤有机质、全磷、碱解氮、孔隙度和pH构成评价风沙土壤质量的最小数据集(MDS)。最小集耕作指数(MDS-TI)分别与全量数据集耕作指数(TDS-TI)和玉米产量呈极显著正相关,相关系数分别为 $r=0.95$ 和 $r=0.96$,表明可以用最小数据集替代全量数据集来评价土壤质量。依据耕作指数0~1取值范围,将耕作指数分为0~0.33,0.33~0.66,0.66~1.00,对应耕层土壤地力高中低3个等级。该研究的18个调查点高产田占11.1%,中产田最多,占55.6%,低产田占33.3%,说明风沙土区农田以中低产田为主。[结论]利用最小数据集耕作指数可以有效评价东北风沙土壤质量,为东北风沙土质量评价和中低产田改良提供理论参考。

关键词 风沙土;耕作指数;玉米;土壤质量

中图分类号 S154.1 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2020)02-0010-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.02.003



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Tillage Layer Quality Assessment of Aeolian Sandy Soil in Northeast China Based on Multiple Linear Regression

ZHONG Xin, QIAO Yun-fa, ZHAO Hong-fei et al (Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044)

Abstract [Objective] Using tillage index (TI) to quantitatively evaluate the soil quality of farmland plough layer in northeast aeolian sandy soil area, and provide scientific basis for accurately evaluating soil quality of plough layer in northeast aeolian sandy soil area. [Method] Based on the differences in soil fertility, 18 survey sites were selected for the measurement of 28 routine soil physical and chemical properties and corn yield based on the differences in soil fertility in Heilongjiang Province. A multivariate linear regression method was used to establish a minimum data set (MDS) for the quality evaluation of the plough layer, and the soil tillage index (TI) was calculated. [Result] Multiple regression results indicated that soil organic matter, total phosphorus, basic nitrogen, porosity and pH constitute the minimum data set (MDS) for evaluating sandy soil quality. The minimum data set tillage index (MDS-TI) was significantly positively correlated with the full data data set tillage index (TDS-TI) and maize yield, with correlation coefficients $r=0.95$ and $r=0.96$, indicating that the minimum data may have been used to set up an alternate complete data set to assess soil quality. According to the range of farming index 0~1, the tillage index was divided into 0~0.33, 0.33~0.66, 0.66~1.00, corresponding to the high, medium and low grades of soil fertility. Among the 18 survey sites in this study, high-yield fields accounted for 11.1%, middle-yield fields accounted for the most, 55.6%, and low-yield fields accounted for 33.3%, indicating that sandy soil areas were mainly low-yielding and middle-yielding fields. [Conclusion] Using the minimum data set tillage index can effectively evaluate the soil quality of the aeolian sandy soil in northeast China, and provide a theoretical reference for the quality evaluation of the aeolian sandy soil and the improvement of the middle-yielding and low-yielding fields.

Key words Aeolian sandy soil; Tillage index; Maize; Soil quality

土壤质量是土壤的许多物理、化学和生物学性质,以及形成这些性质的一些重要过程的综合体现^[1]。近年来,人们越来越多关注耕层土壤质量问题,对土壤质量的深入研究有助于土壤可持续管理。土壤质量评价是反映土壤肥力的重要方法,能够反映出土壤的健康状况^[2]。东北地区玉米种植面积占全国玉米种植面积的1/3以上,是我国玉米主产区,年均总产量为6500万t左右,占全国玉米产量的40%,被誉为我国的“粮仓”^[3]。但是,东北平原约10%的中低产田主要分布在风沙土区,严重影响玉米总产^[4]。东北风沙土区降雨量偏少,土壤干旱贫瘠、保水保肥能力较差,风沙土区农田成为东北玉米增产的主要障碍区^[3]。合理评价东北风沙土区耕层土壤质量,对于提高玉米产量有着重要意义。近年来,关于土壤质量评价的研究已成为热点,Tripathi等^[5]利用定量化分析方法,研究耕层构建中土壤性状对土壤质量的影响,再根据不同性状对土壤质量影响力大小,有针对性地开

展适宜的耕作方式。国内外学者多采用多元线性回归、模糊数学、主成分分析方法建立最小数据集对油茶田、亚热带的农业试验田、冷浸田、水旱轮作农田、绿洲等土壤质量进行评价^[6-10],而采用多元线性回归对东北风沙土农田耕层土壤质量评价少见报道。该研究以黑龙江省西部风沙土玉米种植区为基础,利用多元线性回归方法建立评价指标最小数据集,利用耕作指数评价土壤质量,以期对东北风沙土玉米种植区中低产田改良提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况 野外调查区域在黑龙江省大庆市杜尔伯特蒙古族自治县域内,其位于松嫩平原西部(45°53'~47°81'N, 123°45'~124°42'E),地势开阔平坦,春风大,降雨少,“十年九旱”,年降雨量400mm,主要集中在6—8月,年平均气温3.1℃,≥10℃活动积温2600~2800℃,为一年一熟制。土壤类型为风沙土。

1.2 野外调查 2015年10月在黑龙江省大庆市杜尔伯特蒙古族自治县域内风沙土玉米生产区,采用“S”形多点混合采样,依据土壤肥力差异,随机选取18个样点,采集0~20cm耕层土壤样品,测量土壤理化性状,同时采用5点测定玉米产量,采样点分布见图1。

基金项目 农业部公益性行业(农业)科研专项(201503116-03);南京信息工程大学引进人才项目(2015f50)。

作者简介 钟鑫(1995—),男,安徽滁州人,硕士研究生,研究方向:土壤。*通信作者,研究员,博士,博士生导师,从事土壤生态研究。

收稿日期 2019-07-09

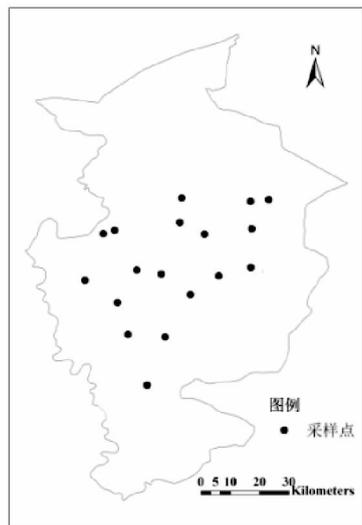


图1 采样点分布

Fig.1 Sample point distribution

1.3 测定项目与方法 耕层深度和犁底层厚度采用直尺测量;pH测定采用电位法;碱解氮测定采用碱解扩散法;速效磷测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;速效钾测定采用乙酸铵浸提-火焰光度法;总氮测定采用凯氏定氮法;全磷测定采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法;全钾测定采用氢氧化

钠熔融-火焰光度法;有机质测定采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法;阳离子交换量(CEC)测定采用EDTA-铵盐快速法;渗透速率、容重、土壤含水量、饱和含水量、田间持水量测定采用环刀法;土壤硬度测定采用TYD-2土壤硬度计;土壤机械组成测定采用吸管法。

1.4 耕作指数计算 28项土壤性状与玉米产量作多元回归分析^[11],得到多元线性回归方程:

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \quad (1)$$

式(1)中, Y 是玉米产量; a, b_1, b_2, \dots, b_n 是回归分析中的常数; X_1, X_2, \dots, X_n 是不同的土壤性状,将这些性状与玉米产量单独作相关性分析,得到各自的相关系数 r_i^2 ,将 r_i^2 与所有回归确定的土壤性状的相关系数之和相比,用 A_i 表示:

$$A_i = r_i^2 / \sum r_i^2 \quad (2)$$

式(2)中, n 表示在回归分析中确定的土壤性状的个数。TI的计算公式为:

$$TI = \sum A_i X_i' \quad (3)$$

式(3)中, X_i' 是被选指标的隶属度值,根据指标与玉米产量的正负相关性,隶属度函数一般分为升型和降型2种^[12](表1),求出评价指数TI值,用作评价土壤质量的依据。

1.5 数据处理与分析 采用SPSS 17.0软件和Excel 2007对数据进行分析处理。

表1 耕层土壤质量评价指标隶属函数

Table 1 Subordinate function of arable layer soil quality evaluation index

隶属函数类型 Membership function type	计算公式 Calculation formula	评价指标 Evaluation index
升型 Ascending type	$X'(x) = \begin{cases} 0.1, x \leq x_1 \\ 0.9(x-x_1)/(x_2-x_1)+0.1, x_1 < x < x_2 \\ 1.0, x \geq x_2 \end{cases}$	耕层深度、犁底层厚度、pH、碱解氮、速效磷、速效钾、总氮、全磷、全钾、有机质、阳离子交换量、渗透速率、含水量、田间持水量、孔隙度、液相比、粉沙、黏粒
降型 Descending type	$X'(x) = \begin{cases} 0.1, x \geq x_2 \\ 0.9(x-x_1)/(x_2-x_1)+0.1, x < x < x_2 \\ 1.0, x \leq x_1 \end{cases}$	硬度、容重、>0.25 mm 团聚体、平均重量直径、固相比、气相比、结构距、细沙和极细沙、粗粒、中粉沙

注: x_2, x_1 为指标阈值上下限

Note: x_2 and x_1 were the upper and lower limits of the index threshold

2 结果与分析

2.1 耕层最小数据集(MDS)建立 最小数据集的确定是土壤质量评价中较为重要的一个环节^[13],该研究利用SPSS 17.0回归分析法中的向前法,对28项土壤理化性状与玉米产量作多元线性回归分析,得到玉米产量与土壤性状之间的线性回归方程为:

$$Y = 1.924 + 0.144SOM + 0.529AN + 0.395TP - 0.201SP + 0.147pH \quad (4)$$

式(4)中,样本量 $n = 28$, $r = 0.979$; Y 为玉米产量(mg/hm^2);SOM为有机质(g/kg),AN为碱解氮(mg/kg);TP为全磷(g/kg),SP为土壤孔隙度(%);pH为酸碱度。其中,有机质、碱解氮、全磷、pH表征土壤化学性状,土壤孔隙度表征土壤物理性状。回归方程显示,玉米产量与上述5项指标之间的相关系数为0.979,说明这5项指标对评价东北风沙土质量可信度为97.9%。选取土壤有机质进入最小数据集,

这与大多数研究者在评价土壤质量时选取的指标相一致,提高耕层土壤有机质含量有利于土壤保水保肥的能力,有机质在土壤质量评价中使用率为60%^[14];碱解氮表征土壤中可供作物直接吸收利用的氮,全磷表征土壤中磷素的总贮量,故选取两者同时进入最小数据集;土壤孔隙度代表土壤的通气状况,pH是反映土壤酸碱度的一个重要指标,在土壤质量评价中使用率达90%^[14],选取土壤孔隙度、pH进入最小数据集。该研究所选取的5个最小数据集指标,有4个指标在最小数据集指标使用率前10位当中^[14],说明该研究的最小数据集具有较好的代表性,适宜于土壤质量评价。

2.2 玉米产量与最小数据集中土壤性状的关系 从表2可以看出,有机质、碱解氮、全磷与玉米产量呈极显著正相关,而土壤孔隙度、pH与玉米产量相关性不显著。玉米产量与有机质(0.857^{**})相关性极显著,这一结果与前人研究结果是相同的,柳开楼等^[15]在研究鄱阳湖流域双季稻田土壤基

础肥力时发现,土壤有机质与土壤基础地力贡献率显著正相关,长期施用有机肥有利于耕地土壤基础地力的提升。碱解氮(0.882**)同样与玉米产量有极显著的相关性,因为土壤碱解氮含量与土壤有机质含量有关,耕地枯枝落叶多,土壤有机质含量就多,枯枝落叶经过微生物分解,氮素又重新回到土壤中^[16-17],使得土壤有机质含量与氮素含量都比较高。全磷(0.888**)与玉米产量相关性极显著,因为磷对植物生长发育、品质和产量影响显著,土壤全磷含量在一定程度上可以反映土壤磷库的大小及其潜在的供磷能力^[18-19],磷含量过少会导致植物无法正常生长,过多则会导致“烧苗”现象。

2.3 土壤耕作指数 根据耕作指数计算方法,依照各相关因子的权重,结合隶属度函数,得最小数据集的TI计算公式为:

$$TI = 0.302SOM' + 0.319AN' + 0.324TP' + 0.010SP' + 0.045pH' \quad (5)$$

计算出最小数据集耕作指数(MDS-TI)。分别将28项理化性状与玉米产量作相关性分析,根据相关系数和隶属度函数,再由公式(3)获得全量数据集耕作指数(TDS-TI)。验

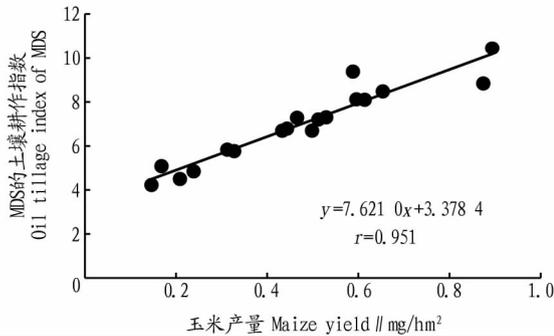


图2 全量数据集土壤耕作指数、玉米产量与最小数据集土壤耕作指数的相关性

Fig.2 Correlation between soil tillage index, maize yield and minimum dataset soil tillage index in full dataset

2.4 风沙土耕地土壤地力分析 耕地的基础生产能力称为耕地地力,地力的高低直接影响地上作物产量^[22]。基于耕作指数取值0~1,将风沙土区土壤地力划分为高、中、低3个等级(表3),TI值越接近于1,代表土壤质量越高^[11],作物产量越高。该研究18个样点的耕作指数为0.15~0.90,其中有6个样点耕作指数为0~0.33,属于低产田,玉米产量为4.2~6.3 mg/hm²;中产田最多,有10个样点,约占总采样点的

证最小数据集评价土壤质量的合理性是研究土壤质量评价方法的重要步骤^[20-21],利用全量数据集验证最小数据集得出的结果的合理性,能确保最小数据集的科学有效性,使研究结果具有较高的可信度^[14]。将MDS-TI值与玉米产量和TDS-TI分别作相关性分析,结果显示其与玉米产量和TDS-TI呈极显著正相关(图2),说明风沙土耕层最小数据集可以取代全量数据集对东北风沙土区土壤质量进行评价。

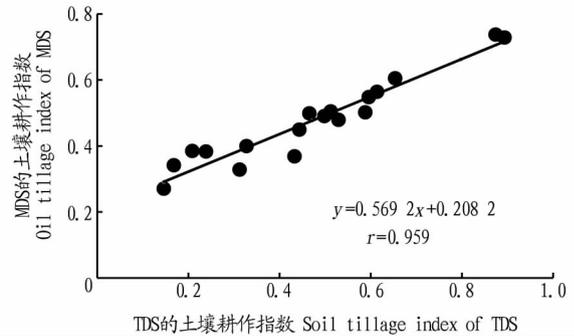
表2 土壤性状与玉米产量线性回归分析

Table 2 Linear regression analysis of soil traits and maize yield

土壤性状 Soil properties	相关性 Relevance	r
有机质 Organic matter	$Y = 0.393x + 2.679$	0.857**
碱解氮 Alkaline hydrolyzed nitrogen	$Y = 0.046x + 3.950$	0.882**
全磷 Total phosphorus	$Y = 17.128x - 0.328$	0.888**
孔隙度 Porosity	$Y = 0.048x + 4.992$	0.155
pH	$Y = 0.570x + 2.827$	0.331

注: ** 为土壤性状与玉米产量相关性极显著($P < 0.01$)

Note: ** There was a significant correlation between soil properties and maize yield ($P < 0.01$)



55.6%,耕作指数为0.33~0.66;高产田有2个,耕作指数为0.60~0.80,玉米产量高于8.4 mg/hm²。总的来说,18个样点平均玉米产量为7.0 mg/hm²,平均耕作指数为0.47,属于中产田地力水平,说明东北风沙土区玉米田地力属于中产田。在风沙土区中低产田改造中,增施有机质和氮磷肥有助于改善土壤理化性质,提高土壤地力。

表3 东北风沙耕地耕层地力阈值诊断

Table 3 Diagnosis of ground force threshold of tillage layer in Northeast aeolian sandy

地力 Ground force	土壤耕作指数 Soil tillage index	有机质 Organic matter g/kg	碱解氮 Alkaline hydrolyzed nitrogen mg/kg	全磷 Total phosphorus g/kg	孔隙度 Porosity %	pH
高产田 High-yielding field	0.66~1.00	>14.6	>95.5	>0.51	>48.4	7.69
中产田 Middle-yielding field	0.33~0.66	9.9~14.6	56.6~95.5	0.39~0.51	37.1~48.4	6.96~7.69
低产田 Low-yielding field	0~0.33	<9.9	<56.6	<0.39	<37.1	6.23~6.96

3 结论

该研究对杜蒙县风沙土玉米产区地力状况进行了评价,利用多元线性回归模型和隶属度函数,从28项土壤理化性状指标中,筛选出有机质、土壤全磷、土壤碱解氮、土壤孔隙

度以及pH这5项指标构成评价风沙土壤地力的最小数据集(MDS),获得最小数据集的耕作指数(MDS-TI),最小数据集耕作指数与全量数据集耕作指数(TDS-TI)和玉米产量呈极(下转第19页)

- PNAS, 2011, 108(49):19451-19452.
- [24] SCHOCH C L, SEIFERT K A, HUHNDORF S, et al. Nuclear ribosomal internal transcribed spacer (ITS) region as a universal DNA barcode marker for *Fungi* [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2012, 109(16): 6241-6246.
- [25] 费希同, 巨苗苗, 林源, 等. ITS2 序列在植物 DNA 条形码鉴定中的应用(综述) [J]. *亚热带植物科学*, 2014, 43(4): 339-342.
- [26] JOSEPH N, KRAUSKOPF E, VERA M I, et al. Ribosomal internal transcribed spacer 2 (ITS2) exhibits a common core of secondary structure in vertebrates and yeast [J]. *Nucleic acids research*, 1999, 27(23): 4533-4540.
- [27] ISMAIL N Z, ARSAD H, SAMIAN M R, et al. Assessment of three plastid DNA barcode markers for identification of *Clinacanthus nutans* (Acanthaceae) [J]. *3 Biotech*, 2018, 8(1): 62.
- [28] 樊佳佳, 张婉冰, 向丽, 等. 探索 *psbA-trnH* 序列对竹茹、天竺黄及其近缘物种的鉴定 [J]. *世界科学技术-中医药现代化*, 2014, 16(11): 2349-2354.
- [29] 高婷. 利用 DNA 条形码技术鉴定药用双子叶植物 [D]. 北京: 中国协和医科大学, 2010.
- [30] 黄琼林, 马新业, 詹若挺, 等. 基于 *rbcL* 条形码的鸡血藤真伪鉴别 [J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(6): 57-60.
- [31] 刘枫, 赵群, 戴军, 等. DNA 分子标记技术在石斛属鉴别中的应用进展 [J]. *皖西学院学报*, 2017, 33(2): 9-13, 31.
- [32] 谢伟玲, 邹蓉, 杨雪, 等. 珍稀濒危植物 DNA 条形码研究进展 [J]. *北方园艺*, 2015(4): 178-183.
- [33] 赵月梅, 李筱玲. *matK* 和 *rbcL* 序列在半夏属中的应用 [J]. *高洛学院学报*, 2016, 30(6): 67-70.
- [34] HOLLINGSWORTH P M, FORREST L L, SPOUGE J, et al. A DNA barcode for land plants [J]. *Proceedings of the national academy of sciences*, 2009, 106(31): 12794-12797.
- [35] MOHAMMED B M, SALLEH F M, SHAMSIR M S, et al. Review: DNA barcoding and chromatography fingerprints for the authentication of botanicals in herbal medicinal products [J]. *Evidence-based complementary and alternative medicine*, 2017, 2017: 1-28.
- [36] HAWKINS J, DE VERE N, GRIFFITH A, et al. Using DNA metabarcoding to identify the floral composition of honey: A new tool for investigating honey bee foraging preferences [J]. *PLoS One*, 2015, 10(8): 1-20.
- [37] FET V, GRAHAM M R, WEBBER M M, et al. Two new species of *Euscropsius* (Scorpiones: Euscorpidae) from Bulgaria, Serbia, and Greece [J]. *Zootaxa*, 2014, 82(12): 83-105.
- [38] WARD R D, HOLMES B H, O'HARA T D. DNA barcoding discriminates echinoderm species [J]. *Molecular ecology resources*, 2008, 8(6): 1202-1211.
- [39] 张彬. 当归属药用植物及药材的 DNA 条形码鉴别研究 [D]. 北京: 中国中医科学院, 2012.
- [40] 孙涛, 孔德英, 滕少娜, 等. 基于 ITS2 序列的黄连及其伪混品的分子鉴定 [J]. *贵州农业科学*, 2013, 41(9): 20-22.
- [41] 夏哲, 丁梅. COI 基因微条形码技术在毛发种属鉴定中的应用 [J]. *法医学杂志*, 2016, 32(6): 441-443, 454.
- [42] 王孟虎, 许亮, 康廷国, 等. 动物类中药 DNA 条形码鉴定研究进展 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2016, 22(15): 227-234.
- [43] KRAWCZYK K, NOBIS M, MYSZCZY NSKI K, et al. Plastid super-barcodes as a tool for species discrimination in feather grasses (Poaceae: *Stipa*) [J]. *Scientific reports*, 2018, 8(1): 1-10.
- [44] 裴男才, 陈步峰. 生物 DNA 条形码: 十年发展历程、研究尺度和功能 [J]. *生物多样性*, 2013, 21(5): 616-627.
- [45] 许燕, 肖洪贺, 段双蕊, 等. 动物类中药鉴定技术研究进展 [J]. *中国中医药现代远程教育*, 2018, 16(17): 156-158.
- [46] CAO M, WANG J K, YAO L, et al. Authentication of animal signatures in traditional Chinese medicine of *Lingyang Qingfei Wan* using routine molecular diagnostic assays [J]. *Molecular biology reports*, 2014, 41(4): 2485-2491.
- [47] RAMAN G, CHOI K S, PARK S. Phylogenetic relationships of the fern *Cyrtomium falcatum* (Dryopteridaceae) from dokdo island, sea of east Japan, based on chloroplast genome sequencing [J]. *Genes*, 2016, 7: 12-19.
- [48] STULL G W, MOORE M J, MANDALA V S, et al. A targeted enrichment strategy for massively parallel sequencing of angiosperm plastid genomes [J]. *Applications in plant sciences*, 2013, 1(2): 1-7.

(上接第 12 页)

显著正相关, 说明用最小数据集耕作指数可以替代全量数据集来评价土壤质量。根据 MDS-TI 值取值范围 0~1 特点, 将耕层土壤地力划分为高、中、低 3 个等级, 18 个样点平均耕作指数为 0.47, 说明东北风沙土区玉米田主要属于中产田。总之, 利用目的线性回归模型, 通过耕作指数 TI 对风沙土地力评价, 该方法简单有效, 可以较好地评价东北风沙土区土壤质量, 为开展风沙土区中低产田改造提供科学参考。

参考文献

- [1] 张华, 张甘霖. 土壤质量指标和评价方法 [J]. *土壤*, 2001(6): 326-330, 333.
- [2] 杨镇, 才卓, 景希强, 等. 东北玉米 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 1-2.
- [3] 卢宛菊, 李子忠, 段雯晓, 等. 宽窄行种植对东北风沙土区玉米水分利用及产量的影响 [J]. *土壤通报*, 2014, 45(4): 939-946.
- [4] 乔云发, 苗淑杰, 陆欣春, 等. 不同土壤耕作方式对东北风沙土区玉米田土壤质量及产量的影响 [J]. *水土保持通报*, 2018, 38(3): 19-23.
- [5] TRIPATHI R P, SHARMA P, SINGH S. Tillage index: An approach to optimize tillage in rice-wheat system [J]. *Soil and tillage research*, 2005, 80(1/2): 125-137.
- [6] 张弛, 何腾兵, 牟力, 等. 望谟县石屯镇油茶基地土壤质量综合评价 [J]. *山地农业生物学报*, 2017, 36(3): 37-43.
- [7] LIU Z J, ZHOU W, SHEN J B, et al. Soil quality assessment of acid sulfate paddy soils with different productivities in Guangdong Province, China [J]. *Journal of integrative agriculture*, 2014, 13(1): 177-186.
- [8] 邓绍欢, 曾令涛, 关强, 等. 基于最小数据集的南方地区冷浸田土壤质量评价 [J]. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1326-1333.
- [9] 刘金山, 胡承孝, 孙学成, 等. 基于最小数据集和模糊数学法的水旱轮作区土壤肥力质量评价 [J]. *土壤通报*, 2012, 43(5): 1145-1150.
- [10] 贡璐, 张雪妮, 冉启洋. 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价 [J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 682-689.
- [11] 徐尚起, 张明园, 孙国峰, 等. 应用耕作指数评价耕作措施对双季稻田土壤质量的影响 [J]. *中国农业科学*, 2011, 44(19): 3999-4006.
- [12] 乔云发, 钟鑫, 苗淑杰, 等. 基于最小数据集的东北风沙土农田耕层土壤质量评价指标 [J]. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 132-138.
- [13] 张福平, 高张, 李肖娟, 等. 基于最小数据集的周至县猕猴桃园地土壤质量评价 [J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(1): 69-75.
- [14] 金慧芳, 史东梅, 陈正发, 等. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(7): 155-164.
- [15] 柳开楼, 韩天富, 黄庆海, 等. 鄱阳湖流域长期施肥下双季稻田的土壤基础地力 [J]. *应用生态学报*, 2019, 30(1): 209-216.
- [16] 刘骞, 曾文津, 赵宇, 等. 城市不同功能分区草坪绿地土壤有机碳与碱解氮垂直分布特征 [J]. *四川林业科技*, 2019, 40(1): 25-29.
- [17] 陈庆强, 沈承德, 易惟熙, 等. 土壤碳循环研究进展 [J]. *地球科学进展*, 1998, 13(6): 555-563.
- [18] 李渊, 官澜波, 苏宏伟, 等. 川南不同林龄马尾松人工林土壤磷素变化特征 [J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(6): 63-67, 113.
- [19] 洗应男, 陈婵, 方晰, 等. 湘中丘陵地区 4 种植被类型土壤全磷、有效磷含量的变异特征 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(5): 79-88.
- [20] 徐建明, 张甘霖, 谢子苗, 等. 土壤质量指标与评价 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [21] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles [J]. *Journal of hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.
- [22] 张颖, 赵庚星, 王卓然, 等. 山东棕壤耕地地力评价及其特征分析 [J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(4): 359-366.