

东北典型县域稻田土壤肥力评价及其空间变异

王远鹏^{1,2}, 黄 晶^{2,3†}, 柳开楼^{2,4}, 韩天富², 都江雪², 马星竹⁵, 郝小雨⁵,

周宝库⁵, 刘彩文⁶, 蒋先军^{1*}, 张会民^{2,3*}

(1 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 3 祁阳农田生态系统国家野外试验站, 湖南祁阳 426182; 4 江西省红壤研究所/国家红壤改良工程技术研究中心/农业农村部江西耕地保育科学观测实验站, 江西南昌 330046; 5 黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所/黑龙江省土壤环境与植物营养重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150086; 6 黑龙江省方正县农业技术推广中心, 黑龙江方正 150800)

摘要:【目的】明确东北典型县域稻田土壤肥力空间变异特征, 为该区域稻田土壤合理培肥管理提供科学依据。【方法】以黑龙江省方正县为研究区域, 2017 年在该研究区域采取 114 个代表性点位的稻田土壤, 选取容重、pH、全氮含量、有效磷含量、速效钾含量、有机质含量和阳离子交换量作为土壤综合肥力评价指标, 采用相关系数法确定各个指标的权重, 根据东北稻田土壤特征, 选择隶属度函数曲线, 并确定隶属度函数转折点, 依据模糊数学法的加乘原理, 利用各土壤肥力指标的权重值和隶属度值计算土壤综合肥力指数; 采用 GIS 和地统计学相结合的方法, 确定各项肥力指标和综合肥力指数的空间变异特征和分布格局; 通过主成分分析探究土壤肥力差异的主控因子。【结果】描述性统计分析表明, 方正县稻田土壤综合肥力指数在 0.18~0.99, 平均值为 0.60。土壤容重和 pH 的变异系数分别为 9.15% 和 5.69%, 属于弱变异强度, 其他肥力指标的变异系数在 20.01%~36.18%, 属于中等变异强度。地统计学研究表明, 土壤容重、全氮含量、有机质含量和阳离子交换量的块金系数在 39%~50%, 它们具有中等强度的空间自相关性, 土壤 pH、有效磷含量、速效钾含量和综合肥力指数的块金系数均在 25% 以下, 它们具有强烈的空间自相关性。方正县土壤综合肥力指数值在 0.70 以上的稻田占 16%, 在 0.60~0.70 的稻田占 45%。各个肥力指标中, 土壤有效磷含量和速效钾含量的分布特征与综合肥力指数相似, 呈南高北低的分布格局; 土壤 pH 和阳离子交换量由稻区中部向南北方向逐渐降低; 土壤容重由西北向东南呈逐渐降低的趋势; 土壤有机质和全氮含量均表现为由东南向西北逐渐降低的趋势, 土壤有机质含量在 30 g/kg 以上的稻田占比为 97%, 土壤全氮含量在 1.5 g/kg 以上的稻田占比为 84%; 其中北部蚂蚁河沿岸土壤全氮、有效磷、速效钾和有机质含量相对较低。利用主成分分析得到各项肥力指标的综合得分值由大到小依次为: 土壤有效磷含量、速效钾含量、有机质含量、阳离子交换量、全氮含量、pH 和容重。【结论】方正县 61% 的稻田土壤肥力处于中等及以上水平, 稻田土壤肥力整体呈现出南高北低的分布格局。土壤有效磷和速效钾含量是造成土壤肥力差异的主要因子。

关键词: 方正县; 稻田土壤; 肥力评价; 地统计学; 主成分分析

Evaluation and spatial variability of paddy soil fertility in typical county of northeast China

WANG Yuan-peng^{1,2}, HUANG Jing^{2,3†}, LIU Kai-lou^{2,4}, HAN Tian-fu², DU Jiang-xue², MA Xing-zhu⁵, HAO Xiao-yu⁵,
ZHOU Bao-ku⁵, LIU Cai-wen⁶, JIANG Xian-jun^{1*}, ZHANG Hui-min^{2,3*}

(1 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 3 National Observation Station of Qiyang Agri-ecology System, Qiyang, Hunan 426182,

收稿日期: 2019-04-09 接受日期: 2019-08-20

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (2016YFD0300901); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (161032019035, 161032019020)。

联系方式: 王远鹏 E-mail: 229580029@qq.com; †黄晶与第一作者同等贡献 E-mail: huangjing@caas.cn

* 通信作者 蒋先军 E-mail: jiangxj@swu.edu.cn; 张会民 E-mail: zhanghuimin@caas.cn

China; 4 Jiangxi Institute of Red Soil/National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement/Scientific Observation and Experimental Station of Arable Land Conservation in Jiangxi, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanchang, Jiangxi 330046, China; 5 Institute of Soil Fertilizer and Environment Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Soil Environment and Plant Nutrition in Heilongjiang Province, Harbin, Heilongjiang 150086, China; 6 Technology Promotion Center of Agriculture in Fangzheng County, Heilongjiang Province, Fangzheng, Heilongjiang 150800, China)

Abstract: 【 Objectives 】 The paper studied the spatial variability of paddy soil fertility in typical county of northeast China, aiming to provide a scientific basis for rational fertilization management of paddy soil in this region. **【 Methods 】** The study was conducted in Fangzheng County of Heilongjiang Province, where total of 114 representative paddy soil samples were taken in 2017. Soil bulk density, pH, total N content, available P content, available K content, organic matter content and CEC were selected as factors of soil fertility evaluation. The correlation coefficient method was used to determine the weight of each factor. According to the characteristics of the paddy soil in northeast China, appropriate membership function curves and turning points were selected to determine membership values. According to the multiplication principle of fuzzy mathematics, the soil integrated fertility index was calculated by weight values and membership values. The spatial variability and distribution pattern of fertility factors and integrated fertility index were determined by the combination of GIS and geostatistics. Principal component analysis was used to explore the contribution factors of soil fertility difference. **【 Results 】** The integrated fertility index of paddy fields in Fangzheng County was between 0.18 and 0.99, with an average of 0.60. The coefficient of variation (CV) of soil bulk density and pH were 9.15% and 5.69%, respectively, which belonged to weak variation intensity. The CV of other fertility factors ranged from 20.01% to 36.18%, belonging to moderate variation intensity. The nugget coefficients of soil bulk density, total N content, organic matter content and CEC were between 39% and 50%, which belonged to moderate spatial autocorrelation. The nugget coefficients of soil pH, available P content, available K content and integrated fertility index were below 25%, belonging to strong spatial autocorrelation. There was 16% of paddy fields with soil integrated fertility index value above 0.70, and 45% ranging from 0.60 to 0.70. The soil integrated fertility index was high in the south and low in the north, accordant to the distribution of available P and K content in soil. Soil pH and CEC decreased gradually in the paddy fields from middle to the north-south direction, and soil bulk density decreased gradually from northwest to southeast. The proportion of paddy fields with organic matter content above 30 g/kg was 97%, and that of paddy fields with soil total N content above 1.5 g/kg was 84%. The contents of total N, available P, available K and organic matter in the soil along the northern Ant River were relatively low. The general scores of fertility factors obtained by principal component analysis were as follows: soil available P content, available K content, organic matter content, CEC, total N content, pH and bulk density. **【 Conclusions 】** The soil fertility of 61% of paddy fields in Fangzheng County is at medium or above level, and the paddy field fertility generally high in the south and low in the north. Soil available P and K content are the main factors causing differences in soil fertility.

Key words: Fangzheng County; paddy soil; fertility evaluation; geostatistics; principal component analysis

东北是我国单季稻主产区之一, 水稻种植面积达到 $5.26 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 水稻年产量为 $3.93 \times 10^7 \text{ t}$ ^[1]。但是由于不合理的化肥施用导致东北地区土壤肥力下降, 土壤有机质含量降低, 土壤酸化严重^[2-4]。要维持农业生产力的可持续发展, 保持或改善土壤肥力质量显得至关重要。因此, 正确评价稻田土壤肥力, 掌握土壤肥力空间分布格局, 探明土壤肥力驱

动因素是科学管理稻田的重要前提。

土壤肥力评价是稻田培肥管理的基础, 目前土壤肥力评价体系趋于成熟, 肥力指标和评价方法的选择趋于多样化和综合化^[5-9]。土壤肥力综合评价的方法主要有基于权重的综合肥力指数法^[10-13]、内梅罗指数法^[14]、主成分分析-聚类分析结合法^[15-16]等。土壤肥力由于受到自然因素和人为因素的作用具有复杂

的空间变异性,而地统计学方法和克里格插值法在土壤属性空间变异的研究中广泛应用^[11-12, 17-24],该方法基于半方差函数利用自相关性对土壤属性的空间结构进行量化分析。Sun 等^[17]利用地统计学方法探究江西余江红壤丘陵区土壤养分的时空变异特征,发现土地利用的变化能够改变土壤养分空间自相关性的范围。张庆利等^[18]将地统计学方法与地理信息系统(geographic information system, GIS)技术相结合,研究金坛市土壤肥力的时空演变规律,结果表明地形地势是影响金坛市土壤养分空间分布的主要原因。吕真真等^[23]利用克里格插值方法,探究环渤海沿海区域不同土层土壤养分空间分布格局。叶回春等^[11]发现,北京延庆盆地土壤有机质和全氮含量主导土壤肥力空间格局,局部地区分布还受有效铜、有效锌等微量元素养分含量的影响。不同地区的农田生态系统中,环境条件、土壤属性和田间管理制度在一定程度上影响土壤养分的转化、吸收、固定和迁移过程,从而影响农田土壤养分的平衡,最终导致不同区域土壤中养分含量变化的不一致^[25]。东北地区水稻种植制度为单季稻,黑龙江省方正县是东北地区单季稻良种工程示范区,研究该区域稻田肥力状况对于研究东北稻田肥力状况具有代表性意义。以方

正县为研究区域,运用模糊数学法对稻田土壤进行综合肥力评价,结合 GIS 和地统计学方法,探究稻田土壤养分空间变异性及土壤综合肥力指数的分布规律及其主控因子,为东北稻田土壤培肥与改良提供依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

方正县属黑龙江省哈尔滨市辖县,位于松花江中游南岸,长白山支脉张广才岭北段西麓(N45°32'46"~46°09'00"、E128°13'41"~129°33'20"),地处寒温带大陆性季风气候区,年均气温 2.6℃,年均降水量为 579.70 mm。该县总面积 3.00×10^5 hm²,为丘陵-低山区地形,中部为冲积平原,东西两侧为低山丘陵(图 1);耕地面积 8.40×10^4 hm²,其中稻田面积 6.70×10^4 hm²,主要分布在蚂蚁河两侧,包括天门乡和会发镇的东部、德善乡的西部以及松南乡、方正镇、宝兴乡。水稻种植制度为一年一熟,水稻年产量 30 万 t,是黑龙江省水稻主产区之一。研究稻区土壤成土母质包括坡积物、冲积物、冲洪积物等,土壤类型有草甸土、白浆土、黑土、新积土等(图 1)。

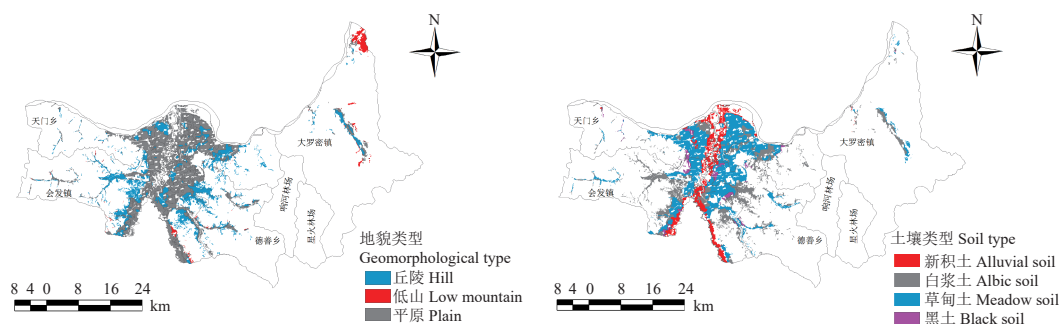


图 1 方正县稻区地貌类型和土壤类型分布区

Fig. 1 Distribution of geomorphological types and soil types in paddy region of Fangzheng County

1.2 样品的采集与分析

以方正县第二次土壤普查的点位为基础,考虑稻田分布格局,兼顾高、中、低产量的合理布设,遵循空间上相对均匀的原则,在研究稻区共设 114 个具有代表性的采样点(图 2)。用 GPS 定位,在半径 500 m 范围内采集 3~5 点耕作层土样,充分混合后以四分法取混合土样,并记录稻田肥料投入情况。样品自然风干,剔除动植物残渣等杂质并过筛,用于土壤理化性质的测定。根据《土壤质量指标与评价》提出的主导性、生产性和稳定性的肥力

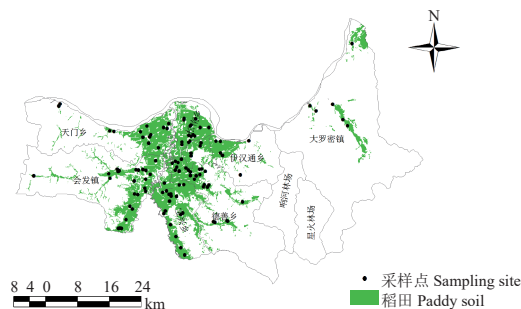


图 2 方正县稻田样点分布图

Fig. 2 Sample sites in paddy fields of Fangzheng County

指标选取原则^[26], 参照前人稻田肥力评价的指标^[9, 14], 充分考虑稻田土壤的功能及其特定的环境状况, 选取土壤容重、pH、全氮含量、有效磷含量、速效钾含量、有机质含量和阳离子交换量为评价指标, 测定方法参见《土壤农化分析》^[27]。

1.3 数据处理

利用 Excel 2010 进行数据整理。离群值的存在影响土壤变量的空间分布, 采用阈值法^[23, 28]对离群值进行剔除。土壤肥力指标和土壤综合肥力指数描述统计分析、正态分布检验 (Kolmogorov-Smirnov, 简称 K-S)、Pearson 相关性分析和主成分分析均在 SPSS 19.0 软件完成。半方差函数在 GS + 9.0 软件进行模拟, 根据决定系数 R^2 最大即最优的原则选择理论模型。克里格 (kriging) 空间插值图在 ArcGIS 10.2 的地统计分析模块 (geostatistical analyst) 中完成, 对预测误差进行比较, 比较标准为: 标准平均值 (MSE) 最接近于 0, 标准均方根预测误差 (RMSSE) 最接近于 1^[29]。利用 Origin 9.0 作图。

1.4 研究方法

1.4.1 土壤综合肥力评价 采用相关系数法^[13-14]确定各个肥力指标的权重。首先计算各项肥力指标之间的相关系数 (表 1), 获得某一肥力指标与其他肥力指标相关系数的平均值 (不包括肥力指标自身的相关系数), 将该平均值与所有肥力指标相关系数平均值总和的比值作为该肥力指标的权重, 土壤容重、pH、全氮含量、有效磷含量、速效钾含量、有机质含量和阳离子交换量的权重值分别为: 0.18、0.06、0.12、0.17、0.18、0.16 和 0.13。

肥力指标的隶属度值的确定: 确立各项肥力指标的隶属度函数模型^[10], 计算隶属度值。土壤有机质含量、全氮含量、有效磷含量、速效钾含量和阳离

子交换量的隶属度采用 S 型隶属函数公式 (1) 确定, 土壤容重和 pH 采用抛物线型隶属函数公式 (2) 确定。

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 & x \geq x_2 \\ 0.9(x - x_1)/(x_2 - x_1) + 0.1 & x_1 < x < x_2 \\ 0.1 & x \leq x_1 \end{cases} \quad (1)$$

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 - 0.9(x - x_3)/(x_4 - x_3) & x_3 < x < x_4 \\ 1.0 & x_2 < x < x_3 \\ 0.9(x - x_1)/(x_2 - x_1) + 0.1 & x_1 < x < x_2 \\ 0.1 & x \leq x_1 \text{ 或 } x \geq x_4 \end{cases} \quad (2)$$

参考全国第二次土壤普查的养分分级标准^[30] (表 2) 和《土壤质量指标与评价》^[26] 中推荐的关于稻田土壤肥力指标隶属度函数的阈值范围, 在掌握方正县稻田土壤养分状况的基础上, 确定隶属度函数曲线转折点的值 (表 3)。

土壤综合肥力评价指数的计算: 以模糊数学中的加乘原则为原理, 利用各土壤肥力指标的权重值和隶属度值计算土壤综合肥力指数 (integrated fertility

表 1 土壤肥力指标之间的相关系数
Table 1 The correlation coefficient between soil fertility factors

指标 Index	BD	pH	TN	AP	AK	OM	CEC
BD	1						
pH	0.08	1					
TN	-0.47	-0.10	1				
AP	-0.06	0.19	0.24	1			
AK	-0.17	0.23	0.31	0.52	1		
OM	-0.54	-0.04	0.74	0.40	0.39	1	
CEC	-0.383	0.16	0.35	0.18	0.33	0.48	1

注 (Note): BD—容重 Bulk density; TN—全氮 Total N; AP—有效磷 Available P; AK—速效钾 Available K; OM—有机质 Organic matter; CEC—阳离子交换量 Cation exchange capacity.

表 2 土壤养分分级标准对照表
Table 2 Criteria for grading of soil nutrients

等级 Grade	TN (g/kg)	AP (mg/kg)	AK (mg/kg)	OM (g/kg)	CEC (cmol/kg)
1	> 2.00	> 40	> 200	> 40	> 20.0
2	1.50~2.00	20~40	150~200	30~40	15.4~20.0
3	1.00~1.50	10~20	100~150	20~30	10.5~15.4
4	0.75~1.00	5~10	50~100	10~20	6.2~10.5
5	0.50~0.75	3~5	30~50	6~10	< 6.2
6	< 0.50	< 3	< 30	< 6	

注 (Note): TN—全氮 Total N; AP—有效磷 Available P; AK—速效钾 Available K; OM—有机质 Organic matter; CEC—阳离子交换量 Cation exchange capacity.

表 3 隶属函数曲线转折点取值
Table 3 The turning point of membership function

转折点 Turning point	BD (g/cm ³)	pH	TN (g/kg)	AP (mg/kg)	AK (mg/kg)	OM (g/kg)	CEC (cmol/kg)
x_1	1	5.5	1	20	130	20	10
x_2	1.1	6.5	2.5	40	200	50	20
x_3	1.2	7					
x_4	1.4	7.5					

注 (Note): BD—容重 Bulk density; TN—全氮 Total N; AP—有效磷 Available P; AK—速效钾 Available K; OM—有机质 Organic matter; CEC—阳离子交换量 Cation exchange capacity.

index, IFI), 具体计算公式如下:

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

式中, F_i 为第 i 项评价指标的隶属度值, W_i 为第 i 项评价指标的权重。IFI 取值范围在 0~1, 该值越接近于 1, 土壤肥力越高。

土壤综合肥力等级的划分: 根据稻田土壤采样点并结合等距法^[31], 参考东北典型黑土地地区土壤肥力划分标准^[26], 将该地稻田土壤肥力分为 5 级: 优秀 (IFI ≥ 0.80)、良好 (IFI: 0.80~0.70)、中等 (IFI: 0.70~0.60)、较差 (IFI: 0.60~0.40) 和差 (IFI < 0.40)。

1.4.2 空间变异研究 经典统计分析: 描述统计分析和正态分布检验。检验数据的正态分布性是使用地统计学克里格方法进行土壤特性空间分析的前提, 只有当数据服从正态分布时, 克里格方法才有效^[29]。K-S 检验值大于 0.05, 则表明数据服从正态分布, 符合地统计学分析要求。

地统计学分析: 半方差函数的计算。半方差函数在地统计学中用来描述区域化变量的空间变化特征与变异程度, 公式如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (4)$$

式中, $\gamma(h)$ 为半方差函数, h 为样点空间间隔距离, 又称为步长 (lag), $N(h)$ 间隔距离为 h 的样点数, $Z(x_i)$ 、 $Z(x_i + h)$ 为区域化变量在空间位置 x_i 、 $x_i + h$ 处的实测值。

块金值 (nugget variance) C_0 、基台值 (sill) $C_0 + C$ 、变程 (range) 作为半方差函数的重要参数, 描述区域化变量在一定尺度上的空间变异和相关程度^[32]。块金值 C_0 反映区域化变量内部随机性的可能程度, 存在由采样误差、短距离的变异、随机和固有变异

引起的各种正基底效应; 基台值 $C_0 + C$ 表示区域化变量的最大变异, 基台值越大表示总的空间变异程度越高。块金系数 $C_0/(C_0 + C)$ 表示由随机性因素 (施肥措施、耕作方式、种植制度) 引起的空间变异占系统总体变异的比值, 当比值 < 25% 时, 表明系统具有强烈的空间自相关性, 系统的变异主要是由结构性因素 (土壤母质、气候、水文、地形) 决定; 比值在 25%~75%, 表明系统的变异主要是由随机性因素和结构性因素共同决定, 具有中等程度的空间自相关性, 当比值 > 75% 时, 则表明空间自相关性较弱, 系统的变异主要是由随机性因素决定^[33]。变程表示养分数据的空间自相关距离。

1.4.3 主成分分析方法 主成分分析是考虑到多个变量间可能存在相互关系, 将原始的多个变量转化为较少几个彼此独立的新变量的降维方法, 寻找潜在的起主控作用的变量^[29, 34]。主成分矩阵中各个变量的载荷值是单位特征向量乘以相应特征值的平方根的结果, 表示主成分与对应变量的相关系数, 载荷值大的变量即表示该主成分的主要影响因子^[15]。利用各个主成分中各个变量系数对应的特征向量与主成分贡献率所占比值的乘积求和^[34], 得到各个变量的综合得分, 通过综合得分找出土壤肥力差异的主控因子。

2 结果与分析

2.1 稻田土壤肥力指标及综合肥力指数的描述性统计分析

对方正县 114 个稻田采样点的土壤肥力指标和综合肥力指数进行统计分析 (表 4), 结果表明土壤容重和 pH 的变异系数较小, 分别为 9.15% 和 5.69%, 表现为弱变异强度。土壤全氮含量、有效磷含量、速效钾含量、有机质含量、阳离子交换量和综合肥力指数的变异系数在 20.01%~36.18%, 属于中等变异强度。该区域稻田土壤综合肥力指数在 0.18~0.99, 平均值为 0.60。由偏度和峰度系数可知, 土壤容重的偏度为负值, 其分布峰为左偏, 其他肥力指标和综合肥力指数的偏度为正值, 分布峰为右偏。采用 Kolmogorov-Smirnov 方法对各项肥力指标和综合肥力指数进行检验, 其 K-S 检验值均大于 0.05, 土壤各项肥力指标和综合肥力指数均服从正态分布, 符合克里格插值要求。

2.2 稻田土壤肥力指标及综合肥力指数的空间结构分析

由表 5 可知, 理论模型均较好反映了土壤肥力指标和综合肥力指数的空间变异特征。土壤容重和

表 4 各项肥力指标及综合肥力指数的描述性统计

Table 4 The descriptive statistics of fertility factors and integrated fertility index

项目 Item	样点数 Samples	极小值 Min.	极大值 Max.	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 (%) CV	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K-S 检验值 K-S test value
BD (g/cm ³)	114	0.92	1.57	1.30	0.12	9.15	-0.31	0.56	0.82
pH	114	5.18	6.78	5.83	0.33	5.69	0.50	0.46	0.29
TN (g/kg)	114	0.72	3.36	1.69	0.44	26.07	0.73	1.11	0.67
AP (mg/kg)	114	12.10	78.10	38.23	13.83	36.18	0.54	-0.05	0.78
AK (mg/kg)	114	101.00	283.50	171.77	37.23	21.67	0.71	0.44	0.15
OM (g/kg)	114	15.70	63.30	36.46	9.56	26.23	0.40	0.58	0.52
CEC (cmol/kg)	114	14.40	36.64	23.22	4.65	20.01	0.59	0.50	0.62
IFI	114	0.18	0.99	0.60	0.18	30.00	0.06	-0.64	0.67

注 (Note): BD—容重 Bulk density; TN—全氮 Total N; AP—有效磷 Available P; AK—速效钾 Available K; OM—有机质 Organic matter; CEC—阳离子交换量 Cation exchange capacity; IFI—综合肥力指数 Integrated fertility index.

表 5 土壤肥力指标和综合肥力指数半方差函数模型及其相关参数

Table 5 Semi-variance model and related parameters of soil fertility factors and integrated fertility index

项目 Item	理论模型 Model	块金值 C ₀	基台值 C + C ₀	块金系数 (%) C ₀ /(C + C ₀)	变程 (m) Range	R ²	预测误差 Prediction error	
							MSE	RMSSE
BD	G	0.0082	0.0211	39	33446	0.826	0.0025	1.1868
pH	E	0.0141	0.1102	13	6360	0.347	0.0001	1.2196
TN	S	0.1088	0.2186	50	21550	0.622	-0.0077	1.0547
AP	S	35.80	197.70	18	8450	0.658	-0.0144	1.2290
AK	G	262	1469	18	5640	0.552	-0.0072	1.2347
OM	S	54.20	132.30	41	31073	0.856	-0.0099	1.1046
CEC	S	13.99	28.58	49	39660	0.867	0.0102	1.1129
IFI	E	0.0052	0.0324	16	3510	0.422	0.0069	0.9687

注 (Note): BD—容重 Bulk density; TN—全氮 Total N; AP—有效磷 Available P; AK—速效钾 Available K; OM—有机质 Organic matter; CEC—阳离子交换量 Cation exchange capacity; IFI—综合肥力指数 Integrated fertility index. G—高斯模型 Gaussian model; E—指数模型 Exponential model; S—球状模型 Spherical model; MSE—均方误差 Mean square error; RMSSE—标准化均方根误差 Root mean square standardizd error.

速效钾含量为高斯模型, 土壤 pH 和综合肥力指数为指数模型, 土壤全氮含量、有效磷含量、有机质含量和阳离子交换量为球状模型。土壤容重、全氮含量、有机质含量和阳离子交换量的块金系数在 39%~50%, 说明它们具有中等强度的空间自相关性, 其空间变异受结构性因素和随机性因素共同影响, 其中结构性因素占主导作用; 土壤 pH、有效磷含量、速效钾含量和综合肥力指数的块金系数均在 25% 以下, 说明它们具有强烈的空间自相关性, 其空间变异受到结构性因素影响。土壤容重、全氮含量、有机质含量和阳离子交换量的变程较大, 分别为 33446、21550、31073、39660 m, 表明它们具有较大范围的

空间连续性。土壤 pH、有效磷含量、速效钾含量和综合肥力指数的变程较小, 分别为 6360、8450、5640、3510 m, 说明它们的空间自相关范围较小。

2.3 稻田土壤肥力指标及综合肥力指数的空间分布特征

利用 ArcGIS 地统计分析模块中的普通克里格方法, 绘制土壤肥力指标和综合肥力指数的分布图 (图 3)。由图 3 可知, 土壤有机质和全氮含量的分布特征相似, 表现为由东南向西北逐渐降低的趋势, 97% 的区域土壤有机质含量在 30 g/kg 以上, 84% 的区域土壤全氮含量在 1.5 g/kg 以上。土壤容重由西北向东南逐渐降低, 容重集中在 1.25~1.35 g/cm³。土壤

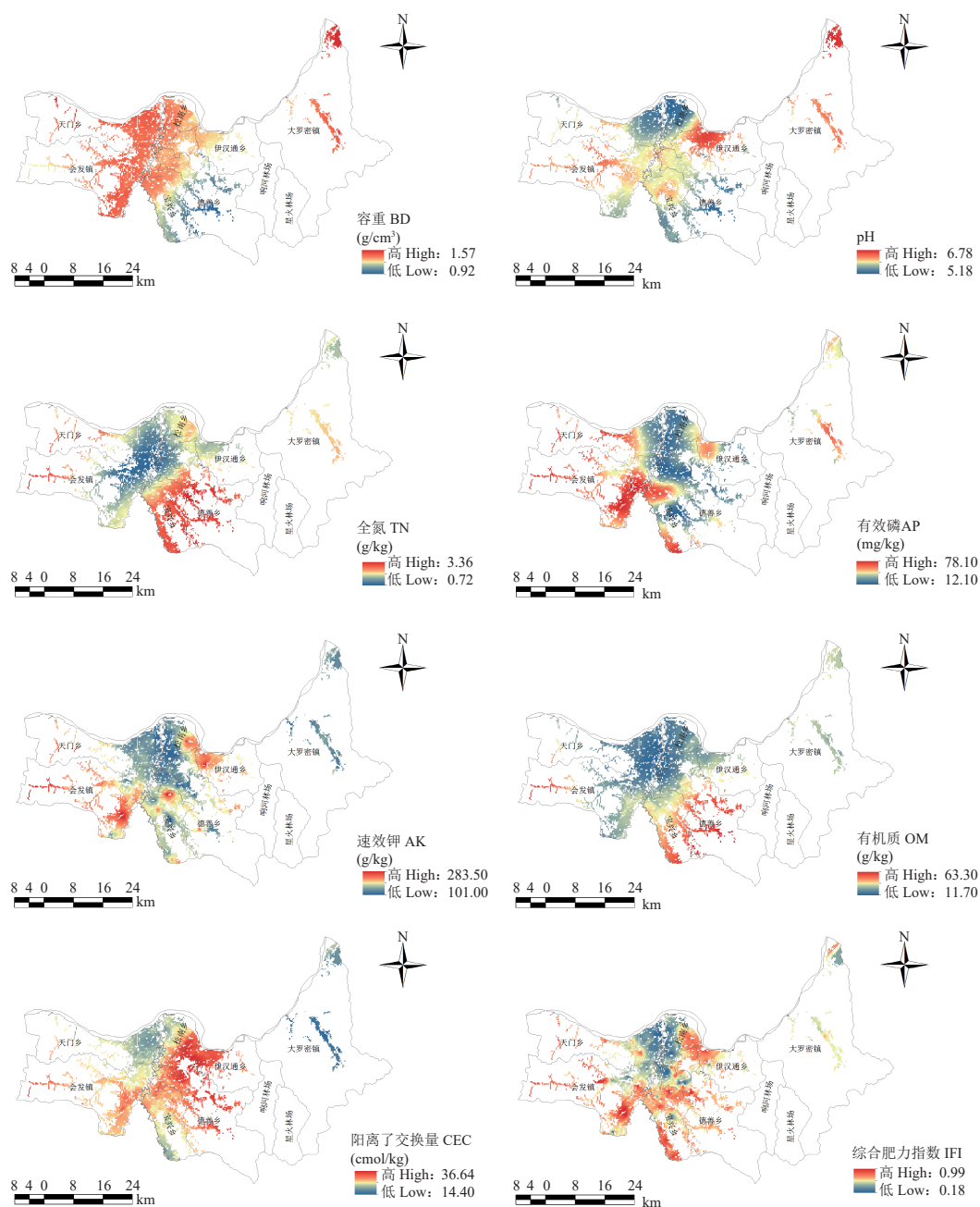


图3 土壤肥力指标及综合肥力指数分布图

Fig. 3 Distribution map of soil fertility factors and integrated fertility index

[注 (Note) : BD—Bulk density; TN—Total N; AP—Available P; AK—Available K; OM—Organic matter; CEC—Cation exchange capacity; IFI—Integrated fertility index.]

pH 和阳离子交换量具有相似的空间分布特征, 均呈现出由稻区中部向南北方向逐渐降低的趋势。土壤速效钾含量、有效磷含量和土壤综合肥力指数的空间分布特征相似, 表现为南高北低的分布格局, 局部地区出现较多不连续的斑块, 其中北部蚂蚁河沿岸土壤速效钾、有效磷含量和土壤综合肥力指数最低。土壤综合肥力指数值在 0.70 以上的稻田占比为 16%, 范围在 0.60~0.70 的稻田占比为 45%。

2.4 稻田土壤肥力主成分分析

利用主成分分析方法, 研究影响方正县稻田土壤肥力差异的主要肥力指标, 由于部分土壤肥力指标在主成分中存在交叉效应, 为增强主成分对肥力指标的解释度, 将初始主成分进行最大方差旋转, 结果见表 6。根据累积贡献率 $\geq 80\%$ 提取主成分的原则, 共提取 5 个主成分, 累积贡献率为 90.28%。前 5 个主成分能反映出土壤肥力指标包含的总信息

表 6 土壤肥力主成分分析

Table 6 Principal component analysis of soil fertility

肥力指标 Fertility factor	主成分 Principal component				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
BD	-0.33	-0.03	-0.16	0.92	0.04
pH	-0.07	0.14	0.08	0.03	0.98
TN	0.91	0.12	0.12	-0.18	-0.06
AP	0.27	0.84	-0.06	0.11	0.10
AK	0.07	0.84	0.26	-0.16	0.09
OM	0.80	0.30	0.25	-0.27	-0.05
CEC	0.24	0.13	0.93	-0.15	0.10
Ei	1.70	1.55	1.05	1.02	1.00
CR (%)	24.34	22.18	14.96	14.50	14.30
CCR (%)	24.34	46.52	61.48	75.98	90.28

注 (Note): BD—容重 Bulk density; TN—全氮 Total N; AP—有效磷 Available P; AK—速效钾 Available K; OM—有机质 Organic matter; CEC—阳离子交换量 Cation exchange capacity; Ei—特征值 Eigenvalue; CR—贡献率 Contribution rate; CCR—累计贡献率 Cumulative contribution rate.

的 90.28%, 因此利用主成分研究方正县稻田土壤肥力差异的主控因子是可行的。第一主成分载荷值大的土壤肥力指标为全氮和有机质含量, 反映的是土壤养分的蓄积能力; 第二主成分以有效磷和速效钾含量为主要的影 响因子, 表征的是土壤对水稻的速效养分的供给能力; 第三、四、五主成分分别以阳离子交换量、容重和 pH 为主要的影 响因子。由于第一和第二主成分中存在共性因子, 选择这两个主成分绘制主成分的分布图 (图 4), 第一主成分的空间分布特征与土壤有机质和全氮含量的分布特征一致, 稻田土壤养分蓄积能力由西北向东南逐渐增加; 第二主成分的空间分布特征与有效磷和速效钾含量的分布特征相似, 土壤速效养分的供给能力由北部蚂

蚁河沿岸向四周逐渐增加。根据土壤肥力指标综合得分 (图 5), 可知造成稻田土壤肥力差异的影响指标依次为土壤有效磷含量、速效钾含量、有机质含量、阳离子交换量、全氮含量、pH 和容重。

3 讨论

3.1 稻田土壤肥力评价

描述性统计分析的结果 (表 4) 表明, 方正县稻田土壤综合肥力指数的平均值为 0.60, 土壤肥力处于中等水平。根据《全国第二次土壤普查技术规程》规定的养分分级标准^[30], 土壤呈微酸性, 偏紧实, 由于缺乏有机肥的投入, 长期偏施无机肥, 破坏土壤结构的稳定性, 容重增加, 造成土壤酸化^[2,35]; 方正县稻区主要以草甸土和白浆土为主, 土壤耕种年限在 20~30 年, 有研究表明, 随着种稻年限的增加, 草甸土和白浆土的土壤总孔隙度逐年减少, 沙颗粒转变为粉沙颗粒, 土壤容重逐渐增加^[36]。由土壤养分分级标准对照表 (表 2) 可知, 土壤阳离子交换量含量达到一级标准; 土壤全氮、有效磷、速效钾和有机质含量均较为丰富, 达到二级标准。土壤有机质含量较高主要受当地气候条件的影响, 方正县冬季较长且气候寒冷干燥, 不利于微生物活动, 导致土壤有机质分解较慢, 积累较快^[37]。由于气候原因, 富含营养元素的水稻秸秆腐解缓慢^[38], 当地农户大多采用秸秆燃烧的还田方式, 这为稻田提供大量的速效养分, 因此稻田土壤中有效磷和速效钾含量也较为丰富。同时, 土壤有效磷和速效钾含量还受到化肥施入量的影响。根据前人研究结果, 全国水稻单产所用氮 (N)、磷 (P₂O₅)、钾 (K₂O) 肥年均施入量分别为 230.5、76.2、100.8 kg/hm²^[39], 方正县稻田水稻生产的氮 (N)、磷 (P₂O₅)、钾 (K₂O) 肥年均施入量分别为 150、95、195 kg/hm²。与全国相比, 东北稻田具有氮肥用量低、氮素利用效率高的特点^[40],

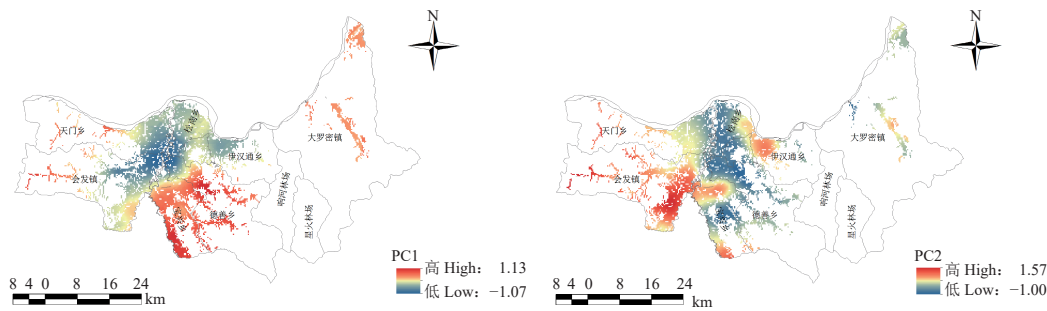


图 4 主成分分布图

Fig. 4 Distribution map of principal component

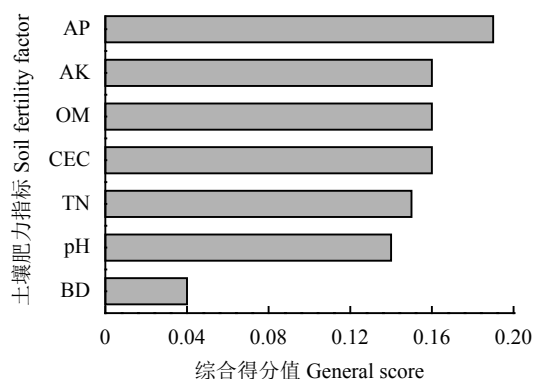


图5 土壤肥力指标综合得分值

Fig. 5 General score of soil fertility factors

[注 (Note): AP—Available P; AK—Available K; OM—Organic matter; CEC—Cation exchange capacity; TN—Total N; BD—Bulk density.]

氮肥施入量低于全国平均水平, 而磷肥和钾肥施入量高于全国平均水平。因此, 燃烧秸秆和高量磷钾肥的长期施用使得土壤中速效养分含量较高。根据主成分分析可知, 速效养分是造成方正县稻田土壤肥力差异的主要贡献因子, 其中土壤有效磷含量得分最高, 且与其他肥力指标相比, 土壤有效磷含量变异系数最大, 主要是与自身特性和田间管理有关, 土壤磷素易被吸附固定造成迁移能力弱, 加之磷肥投入量不均衡造成土壤中磷素分布不均^[20-21]。然而, 部分地区土壤养分的过度累积造成土壤氮磷钾素负荷增大, 存在土壤酸化、面源污染的潜在危险^[9]。

3.2 稻田土壤肥力空间变异特征分析

克里格插值能够对估计点做出最优估计, 估计误差主要受到样点分布和半方差函数模拟精度的影响。本研究区域属于水稻集约种植区, 所选点位基于全国第二次普查数据选择的典型样点, 能够起到以点带面的作用。前人研究发现, 利用有限的典型点位进行土壤肥力区域插值, 能很好的预测土壤肥力分布格局^[13, 18]。根据半方差函数模型参数(表5)可知, 土壤全氮和有机质含量的空间分布受到以结构性因素为主和随机性因素共同作用的影响, 前人研究表明, 海拔与土壤全氮和有机质含量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)^[22, 24]。一方面, 研究稻区东西两侧枝状低山丘陵区土壤有机质和全氮含量明显高于中部平原区; 另一方面, 与丘陵区稻田相比, 中部平原区垦殖历史较长, 在偏施化肥的条件下, 土壤有机质可能消耗较大, 因此中部地区有机质含量较低。土壤容重的空间分布可能与土壤有机质含量有关, 有机质含量高的土壤土质疏松, 土壤容重较

低。阳离子交换量是土壤有机质、土壤矿物含量和土壤颗粒组成的综合反应, 其空间分布主要受到pH和有机质含量的影响^[26]。土壤有效磷和速效钾含量的分布格局受到结构性因素的影响, 在不同的土壤类型下, 土壤有效磷和速效钾的含量大小顺序依次为: 白浆土 > 草甸土 > 新积土。白浆土和草甸土主要是由坡积物发育而来的, 其磷素钾素含量较高, 而蚂蚁河沿岸的新积土主要是由冲积物发育而来。土壤磷、钾初始本底值存在差异, 同时, 稻田集约化管理模式导致稻田化肥无差别投入, 造成低养分地区养分持续不足和高养分地区养分过剩^[20], 放大了结构性因素对土壤有效磷和速效钾含量的影响。庞凤等^[20]研究双流县土壤速效养分空间变异发现, 土壤有效磷和速效钾含量在不同的土壤母质条件下呈极显著差异 ($P < 0.01$), 土壤母质是影响速效养分空间变异的重要因素。土壤有效磷和速效钾含量与土壤综合肥力指数的分布格局相似, 进一步验证了土壤速效养分是方正县稻田土壤肥力差异的主要贡献因子。其中伊汉通乡、方正镇和松南乡的三角区域土壤综合肥力指数较高, 可能该地区管理水平较高, 养分投入合理, pH和阳离子交换量含量较高, 具有较强的保肥能力。有研究表明, 无差别的化肥施入量和田间管理制度造成综合肥力指数的差异性增大^[12], 因此综合肥力指数在空间分布上缺乏连续性, 稻区局部出现不连续的斑块。

3.3 土壤肥力评价方法分析

稻田土壤肥力是水稻生产可持续发展的基础资源, 单一养分指标在一定程度上能够反应土壤肥力的特征, 但难以全面表征土壤肥力, 基于模糊数学法综合评价土壤肥力能够兼顾各项肥力指标, 将定性评价转向定量评价^[9]。同时, 结合模糊数学评价法与地统计学, 将土壤肥力指标在空间上的相关关系纳入研究, 提高土壤肥力指标空间变异的定量研究程度^[29]。主成分分析方法则进一步佐证土壤肥力指标在土壤肥力指数空间差异上的影响程度。多种方法的结合使用能够比较综合地反映土壤肥力的空间整体特征, 但仍存在不足, 主要是缺乏产量数据作为土壤肥力直接验证标准, 产量作为土壤生产力的真实表现, 在一定程度上能够反映土壤肥力水平^[26]。

4 结论

方正县稻田土壤综合肥力指数平均值为 0.60, 16% 的稻田土壤肥力达到良好及以上水平, 45% 的稻田土壤肥力处于中等水平。土壤全氮、有效磷、

速效钾和有机质含量均较为丰富, 其中土壤有效磷和速效钾含量为造成方正县稻田土壤肥力差异的主要贡献因子。土壤综合肥力指数表现为南高北低的空间分布特征, 局部地区出现较多不连续的斑块。方正县稻田土壤养分肥力差异较大, 尤其是北部蚂蚁河沿岸, 该地区土壤全氮、有效磷、速效钾和有机质含量相对较低, 应根据不同区域的具体养分匮乏状况适当调整氮、磷、钾肥施入量比例, 从而较为准确的指导县域尺度的稻田施肥管理。

参 考 文 献:

- [1] 中华人民共和国统计局中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.
- [2] 孟红旗, 刘景, 徐明岗, 等. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1109–1116.
Meng H Q, Liu J, Xu M G, *et al.* Evolution of pH in topsoils of typical Chinese croplands under long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(6): 1109–1116.
- [3] 焉莉, 王寅, 冯国忠, 等. 吉林省农田土壤肥力现状及变化特征[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4800–4810.
Yan L, Wang Y, Feng G Z, *et al.* Status and change characteristics of farmland soil fertility in Jilin Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4800–4810.
- [4] 张淑香, 张文菊, 沈仁芳, 等. 我国典型农田长期施肥土壤肥力变化与研究展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1389–1393.
Zhang S X, Zhang W J, Shen R F, *et al.* Variation of soil quality in typical farmlands in China under long-term fertilization and research expedition[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(6): 1389–1393.
- [5] Andrews S S, Carroll C R. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management[J]. *Ecological Applications*, 2001, 11(6): 1573–1585.
- [6] Lilburne L, Sparling G, Schipper L. Soil quality monitoring in New Zealand: development of an interpretative framework[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2004, 104(3): 535–544.
- [7] Lima A C R, Brussaard L, Totola M R, *et al.* A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 64: 194–200.
- [8] Kosmas C, Kairis O, Karavitis C, *et al.* Evaluation and selection of indicators for land degradation and desertification monitoring: methodological approach[J]. *Environmental Management*, 2014, 54(5): 951–970.
- [9] 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.
Huang J, Jiang X J, Zeng Y H, *et al.* A review on the evaluation methods and indexes of soil fertility in paddy fields[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017, (6): 1–8.
- [10] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价[J]. *土壤学报*, 1995, 32(4): 362–369.
- Sun B, Zhang T L, Zhao Q G. Comprehensive evaluation of soil fertility in the hilly and mountainous region of southeastern China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(4): 362–369.
- [11] 叶回春, 张世文, 黄元仿, 等. 北京延庆盆地农田表层土壤肥力评价及其空间变异[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(15): 3151–3160.
Ye H C, Zhang S W, Huang Y F, *et al.* Assessment of surface soil fertility and its spatial variability in Yanqing Basin, Beijing, China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(15): 3151–3160.
- [12] 王幼奇, 白一茹, 赵云鹏. 宁夏砂田小尺度土壤性质空间变异特征与肥力评价[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(23): 4566–4575.
Wang Y Q, Bai Y R, Zhao Y P. Assessment of soil fertility and its spatial variability based on small scale in the gravel mulched field of Ningxia[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(23): 4566–4575.
- [13] 柳开楼, 黄晶, 张会民, 等. 基于红壤稻田肥力与相对产量关系的水稻生产力评估[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1425–1434.
Liu K L, Huang J, Zhang H M, *et al.* Assessment of productivity of red paddy soil based on soil fertility and relative yield[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1425–1434.
- [14] 包耀贤, 徐明岗, 吕粉桃, 等. 长期施肥下土壤肥力变化的评价方法[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(20): 4197–4204.
Bao Y X, Xu M G, Lü F T, *et al.* Evaluation method of soil fertility under long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(20): 4197–4204.
- [15] 陈欢, 曹承富, 张存岭, 等. 基于主成分-聚类分析评价长期施肥对砂姜黑土肥力的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(3): 609–617.
Chen H, Cao C F, Zhang C L, *et al.* Principal component-cluster analysis of effect of long-term fertilization on the fertility of lime concretion black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(3): 609–617.
- [16] 魏猛, 张爱君, 诸葛玉平, 等. 长期不同施肥方式对黄潮土肥力特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(3): 838–846.
Wei M, Zhang A J, Zhuge Y P, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil fertility in yellow fluvo-aquic soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(3): 838–846.
- [17] Sun B, Zhou S, Zhao Q. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China[J]. *Geoderma*, 2003, 115(1–2): 85–99.
- [18] 张庆利, 史学正, 潘贤章, 等. 江苏省金坛市土壤肥力的时空变化特征[J]. *土壤学报*, 2004, 41(2): 315–319.
Zhang Q L, Shi X Z, Pan X Z, *et al.* Characteristics of spatio-temporal change of soil fertility in Jintan County, Jiangsu Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 315–319.
- [19] Sven G J, Ramia J, Greta J, *et al.* Spatial variability of soil properties in the floodplain of a river oasis in the Mongolian Altay Mountains[J]. *Geoderma*, 2018, 330: 99–106.
- [20] 庞凤, 李廷轩, 王永东, 等. 土壤速效氮、磷、钾含量空间变异特征及其影响因子[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1): 114–120.
Pang S, Li T X, Wang Y D, *et al.* Spatial variability of soil available nitrogen, phosphorus and potassium and influencing factors[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(1): 114–120.
- [21] 于洋, 赵业婷, 常庆瑞. 渭北台塬区耕地土壤速效养分时空变异特征[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1251–1261.
Yu Y, Zhao Y T, Chang Q R. Spatial-temporal variability of soil

- readily available nutrients in cultivated land of Weibei Tableland area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1251–1261.
- [22] 马泉来, 高凤杰, 张志民, 等. 我国东北黑土丘陵区小流域土壤有机质空间分布模拟[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(3): 382–390.
- Ma Q L, Gao F J, Zhang Z M, *et al.* Simulation of spatial distribution of soil organic matter in a mollisol watershed in Northeastern China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(3): 382–390.
- [23] 吕真真, 刘广明, 杨劲松, 等. 环渤海沿海区域土壤养分空间变异及分布格局[J]. *土壤学报*, 2014, 51(5): 944–952.
- Lü Z Z, Liu G M, Yang J S, *et al.* Spatial variability and distribution pattern of soil nutrients in Bohai coastal areas[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(5): 944–952.
- [24] 杜可, 王乐, 张淑香, 等. 黑土区县域土壤养分空间分布特征及其影响因子[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1465–1474.
- Du K, Wang L, Zhang S X, *et al.* Spatial distribution characteristics and influencing factors of soil nutrients in black soil region counties[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1465–1474.
- [25] 孙波, 潘贤章, 王德建, 等. 我国不同区域农田养分平衡对土壤肥力时空演变的影响[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(11): 1201–1208.
- Sun B, Pan X Z, Wang D J, *et al.* Effects of farmland nutrient balance on spatial and temporal evolution of soil fertility in different regions of China[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(11): 1201–1208.
- [26] 徐建明, 张甘霖, 谢正苗, 等. 土壤质量指标与评价[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- Xu J M, Zhang G L, Xie Z M, *et al.* Indices and assessment of soil quality[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil agro-chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [28] 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.
- Wang W N, Lu J W, Lu M X, *et al.* Status quo and variation of soil fertility in paddy field—a case study of Hubei Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(2): 319–330.
- [29] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- Tang G A, Yang X. ArcGIS geographic information system spatial analysis experiment course[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [30] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- National Soil Census Office. China soil census technology[M]. Beijing: Agricultural Press, 1992.
- [31] 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 F R, An P L, Wang J Y, *et al.* Soil quality criteria and methodologies of farmland grad[J]. *Resources Science*, 2002, 24(2): 71–75.
- [32] 李海滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. *应用生态学报*, 1998, 9(6): 93–99.
- Li H B, Wang Z Q, Wang Q C. Theory and method of quantitative research on spatial heterogeneity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(6): 93–99.
- [33] Cambardella C A. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(5): 1501–1511.
- [34] 李建军, 辛景树, 张会民, 等. 长江中下游粮食主产区 25 年来稻田土壤养分演变特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(1): 92–103.
- Li J J, Xin J S, Zhang H M, *et al.* Evolution characteristics of soil nutrients in the main rice production regions, the middle-lower reach of Yangtze River of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(1): 92–103.
- [35] 张北赢, 陈天林, 王兵. 长期施用化肥对土壤质量的影响[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(11): 182–187.
- Zhang B Y, Chen T L, Wang B. Effects of long-term uses of chemical fertilizers on soil quality[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(11): 182–187.
- [36] 王秋菊, 焦峰, 刘峰, 等. 三江平原草甸白浆土种稻后土壤理化性质变化[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4056–4062.
- Wang Q J, Jiao F, Liu F, *et al.* Changes of soil physical and chemical properties of albic soil in the meadow of Sanjiang Plain after rice planting[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 4056–4062.
- [37] 李纯燕, 杨恒山, 萨如拉, 等. 不同耕作措施下秸秆还田对土壤速效养分和微生物量的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 197–201.
- Li C Y, Yang H S, Sa R L, *et al.* Effects of straw returning on soil available nutrients and microbial biomass under different tillage methods[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(1): 197–201.
- [38] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 173–179.
- Gao L W, Ma L, Zhang W F, *et al.* Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(7): 173–179.
- [39] 李红莉, 张卫峰, 张福锁, 等. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5): 1136–1143.
- Li H L, Zhang W F, Zhang F S, *et al.* Chemical fertilizer use and efficiency change of main grain crops in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(5): 1136–1143.
- [40] 彭显龙, 刘洋, 于彩莲, 等. 寒地稻田土壤氮素矿化特征的研究[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(4): 702–709.
- Peng X L, Liu Y, Yu C L, *et al.* Study on the nitrogen mineralization characters of paddy soil in cold area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(4): 702–709.