

DOI: 10.11766/trxb202411050424

CSTR: 32215.14.trxb202411050424

索炎炎, 张翔, 李亮, 李倩, 司贤宗, 徐凤丹, 程培军, 闫萌, 吴士文. 中国花生主产区土壤养分丰缺状况及影响因素[J]. 土壤学报, 2025, 62 (5): 1420–1434.

SUO Yanyan, ZHANG Xiang, LI Liang, LI Qian, SI Xianzong, XU Fengdan, CHENG Peijun, YAN Meng, WU Shiwen. Status and Influencing Factors of Soil Fertilities in the Major Regions of Peanut Production in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62 (5): 1420–1434.

中国花生主产区土壤养分丰缺状况及影响因素^{*}

索炎炎¹, 张翔^{1†}, 李亮¹, 李倩¹, 司贤宗¹, 徐凤丹¹, 程培军¹,
闫萌¹, 吴士文^{2†}

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 河南省农业资源与环境重点实验室, 郑州 450002; 2. 华北水利水电大学数字孪生水利高等研究院, 郑州 450046)

摘要: 明确中国花生产区土壤养分状况, 对指导花生科学施肥、促进花生高产高效生产至关重要。于2022年在中国花生主产区采集1020个耕层土壤样品, 评价了中国花生种植土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾及pH状况, 分析了不同起垄种植方式、产量水平、土壤类型及土壤质地下花生种植土壤养分的变化特征。结果表明, 中国花生主产区土壤有机质、全氮、碱解氮含量平均分别为 $15.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1.01\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $104.49\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别有78.62%、60.49%和43.72%的样点处于缺乏水平, 且主要集中在东北、西北和黄淮海花生产区的辽宁、河北、河南、新疆等地。土壤有效磷含量平均为 $39.76\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 仅有13.14%的样点缺磷, 且主要分布在南方区的云南和长江流域花生产区的四川等地。土壤速效钾含量平均为 $126.71\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有38.62%的样点缺钾, 主要分布在黄淮海的河北和南方花生产区的广东等地。耕作方式、种植方式、产量水平影响土壤养分状况, 起垄种植的土壤碱解氮和速效钾含量分别较平作显著提高6.04%和31.72%; 夏播花生土壤有机质、碱解氮、速效钾和全氮含量较春播和麦套花生分别平均提高24.33%、67.37%、25.85%和14.87%; 高产地块土壤pH、碱解氮、有效磷含量较低产地块分别提高5.48%、6.33%和26.24%。不同土壤类型的土壤养分特征也存在差异, 各土类土壤有机质含量($16.08\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)整体偏低, 以风沙土($11.50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)最低; 风沙土($79.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、褐土($75.33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、灰钙土($84.29\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和潮土($84.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的土壤碱解氮含量缺乏; 各土类土壤有效磷含量($39.43\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)较为丰富, 以砂姜黑土($70.31\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)最高; 砖红壤的土壤速效钾含量($78.78\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)缺乏。整体而言, 中国不同花生产区土壤养分存在较大差异, 土壤有机质、全氮、碱解氮不足主要出现在东北、西北和黄淮海风沙土、潮土和褐土花生产区, 土壤有效磷基本不缺, 土壤速效钾不足主要出现在南方砖红壤花生产区。建议中国花生主产区应严格控制磷肥投入, 在土壤氮、钾缺乏的花生产区适量增施氮肥和钾肥。

关键词: 全国; 花生产区; 土壤养分状况; 空间分布; 影响因素

中图分类号: S158.9 文献标志码: A

* 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-13)、河南省科技攻关项目(23210211014, 242102110174)、河南省自主创新项目(2024ZC049)资助 Supported by the Agricultural Research System of China (No. CARS-13), the Science and Technology Research Key Project of Henan Province, China (Nos. 23210211014 and 242102110174), and the Independent Innovation Project of Henan Province, China (No. 2024ZC049)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zxtf203@163.com; 1987wushiwen@163.com

作者简介: 索炎炎(1985—), 女, 河南夏邑人, 博士, 副研究员, 从事花生养分高效管理技术研究。E-mail: suoyanyan2006@163.com

收稿日期: 2024-11-05; 收到修改稿日期: 2025-03-07; 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-04-15

Status and Influencing Factors of Soil Fertilities in the Major Regions of Peanut Production in China

SUO Yanyan¹, ZHANG Xiang^{1†}, LI Liang¹, LI Qian¹, SI Xianzong¹, XU Fengdan¹, CHENG Peijun¹, YAN Meng¹, WU Shiwen^{2‡}

(1. Institute of Plant Nutrition and Resource Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Henan Key Laboratory of Agriculture Resources and Environment, Zhengzhou 450002, China; 2. Advanced Research Institute for Digital-Twin Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: 【Objective】Clarifying the soil nutrient status of peanut production regions in China is crucial for guiding the scientific fertilization practices in peanut cultivation and promoting high yield and high nutrient use efficiency. 【Method】In 2022, 1 020 soil samples were collected from major peanut production regions in China, and the soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), available N (AN), available phosphorus (AP), available potassium (AK) and pH status were evaluated. The variation characteristics of soil nutrients in peanut planting soils were also analyzed by different ridge planting methods, yield levels, soil types and soil textures. 【Result】The results showed that the average SOM, TN and AN contents in the peanut-producing regions were $15.15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $1.01 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $104.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. Also, 78.62%, 60.49% and 43.72% of the sampling points for SOM, TN and AN were deficient, mainly concentrated in the Northeast, Northwest, and Huang-Huai-Hai peanut production regions, such as Liaoning, Hebei, Henan, and Xinjiang provinces. The average soil AP content was $39.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, with only 13.14% of the sample points in the P deficiency level, mainly distributed in the south and the Yangtze River basin, in areas such as Sichuan and Yunnan provinces. The average soil AK content was $126.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 38.62% of the sample points were deficient in K and mainly distributed in Hebei and Guangdong province in the Huang-Huai-Hai and southern peanut production regions. In addition, the soil nutrient status was affected by the tillage practices, planting modes, and yield levels, with the soil AN and AP contents in ridge cropping significantly increased by 6.04% and 31.72% compared with those of flat cropping. The result also revealed that SOM, AN, AP, and TN contents in summer peanut were significantly increased by 24.33%, 67.37%, 25.85%, and 14.87% (respectively) compared with those of spring peanut and intercropped peanuts with wheat. The soil pH, AN, and AP contents of high-yield plots were respectively increased by 5.48%, 6.33%, and 26.24% compared with those of low-yield plots. There were also differences in soil nutrient characteristics among different soil types. For instance the SOM content ($16.08 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) of all soil types was generally low, with the lowest in the wind-sand soil ($11.50 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) while the soil AN content of the wind-sand soil ($79.20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), brown soil ($75.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), grey calcareous soil ($84.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), and tidal soil ($84.88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) was deficient. The AP content ($39.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) of all soil types was relatively abundant and highest in the lime concretion black soil ($70.31 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) whereas AK content was deficient in the latosols ($78.78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 【Conclusion】There are significant differences in soil nutrients in different peanut-producing regions in China. The deficiencies of SOM, TN, and AN mainly occurred in wind-sand soil, tidal soil and brown soil in the northeast, northwest China, and Huang-Huai-Hai peanut production regions. Also, deficiencies in AK mainly occurred in the peanut areas of southern brick-red soil. It was recommended strict control of the input of P fertilizer and increasing the application of N and K fertilizers in soils with N and K deficiencies in peanut production regions of China.

Key words: Nationwide; Peanut production areas; Soil nutrients status; Spatial distribution; Influencing factors

花生(*Arachis hypogaea* L.)在中国年均种植面积468万hm²以上,是我国种植面积第二大油料作物,年总产量超过了1 832万t,占全国油料作物总产量的49.8%,总产和单产居油料作物之首,对保障我国食用油安全具有重要意义^[1]。由于种植花生具有良好的经济效益,使得我国花生种植面积越来

越大,花生对我国种植业结构具有重要作用^[2]。花生种植区域分布广泛,跨越我国南北34个纬度,东西58个经度^[3],气候条件、地形及成土母质均有所差异,导致各主产区花生种植土壤养分存在一定的空间异质性。土壤养分是花生优质、高产、稳产的基础,掌握花生田土壤养分的丰缺状况是实施科学

施肥、保障花生高产优质的前提条件。

通过 1980s 开展的全国第二次土壤普查和 2005—2014 年开展的测土配方施肥行动, 基本摸清了我国主要农田土壤养分含量和分布状况^[4-5]。然而, 土壤养分状况受作物种植制度、施肥方式、作物养分吸收效率以及化肥减量增效行动、新型肥料推广、作物品种更新换代等多种因素的影响, 在了解全国农田土壤养分状况的基础上, 有针对性地分析不同典型作物的土壤养分丰缺状况, 对指导作物合理施肥具有重要意义。关于花生种植土壤肥力丰缺状况开展了一些研究, 如张静燕等^[6]发现江西省花生主产区土壤 pH 总体呈酸性, 有机质含量偏低, 氮缺乏, 而磷、钾含量丰富。沈云亭等^[7]发现河南省花生产区土壤有机质、全氮含量缺乏, 有效磷丰富, 速效钾中等偏下水平。郭凯等^[8]认为湖北襄阳市夏花生产区土壤 pH 中性, 有机质、全氮、有效磷适量, 碱解氮缺乏, 速效钾丰富。董敬超^[9]调查结果表明, 辽宁阜新花生产区土壤 pH 主要偏酸性, 有机质含量偏低, 缺氮、少磷、钾不足, 养分状况不良。上述研究表明, 尽管在省、市(县)区域范围内, 针对花生主产区土壤养分状况的评价已有少量报道, 但在全国尺度上, 关于花生土壤养分状况分析评价尚属空白。此外, 我国花生生产还面临以下主要问题: 一是, 过去十年间, 我国花生的种植面积、种植方式、品种、田间管理和产量水平等均发生了显著变化; 二是当前花生生产中的养分管理环节仍存在诸多问题, 过度依赖经验进行施肥, 偏重化肥施用而忽视有机肥施用, 导致养分供给不均衡与施肥精准性不足; 三是不同花生产区土壤养分状况差异显著, 养分分布不均衡, 缺乏科学指导与精细化管理。因此, 本研究依托国家花生产业技术体系, 在我国花生典型种植区采集耕层土壤样品, 摸清当前生产条件下全国尺度上花生种植土壤的养分丰缺状况, 分析不同区域、起垄、种植模式和产量水平下土壤养分变化特征, 探索当前花生生产中土壤养分的限制因素, 可为我国花生种植区合理施肥提供理论依据和科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中国花生种植区分布广泛, 本研究依托国家花

生产业技术体系 25 个综合试验站, 在各综合试验站重点联系的主产县(市、区), 选择代表性花生种植户的田块进行采样, 共采集土壤样品 1 020 个, 涵盖了我国 17 个花生种植省(市), 包括东北区(吉林 50 个、辽宁 101 个) 151 个; 黄淮海区(河北 47 个、河南 96 个、山东 125 个) 268 个; 长江流域区(安徽 50 个、湖北 92 个、湖南 42 个、江苏 50 个、江西 48 个、四川 50 个) 332 个; 南方区(福建 53、广东 50、广西壮族自治区 50 个、贵州 50 个、云南 25 个) 228 个; 西北区(新疆维吾尔自治区 41 个) 41 个(图 1)。同时记录取样田块的经纬度, 调查取样田块的花生产量、种植模式、起垄方式和覆膜方式等信息。

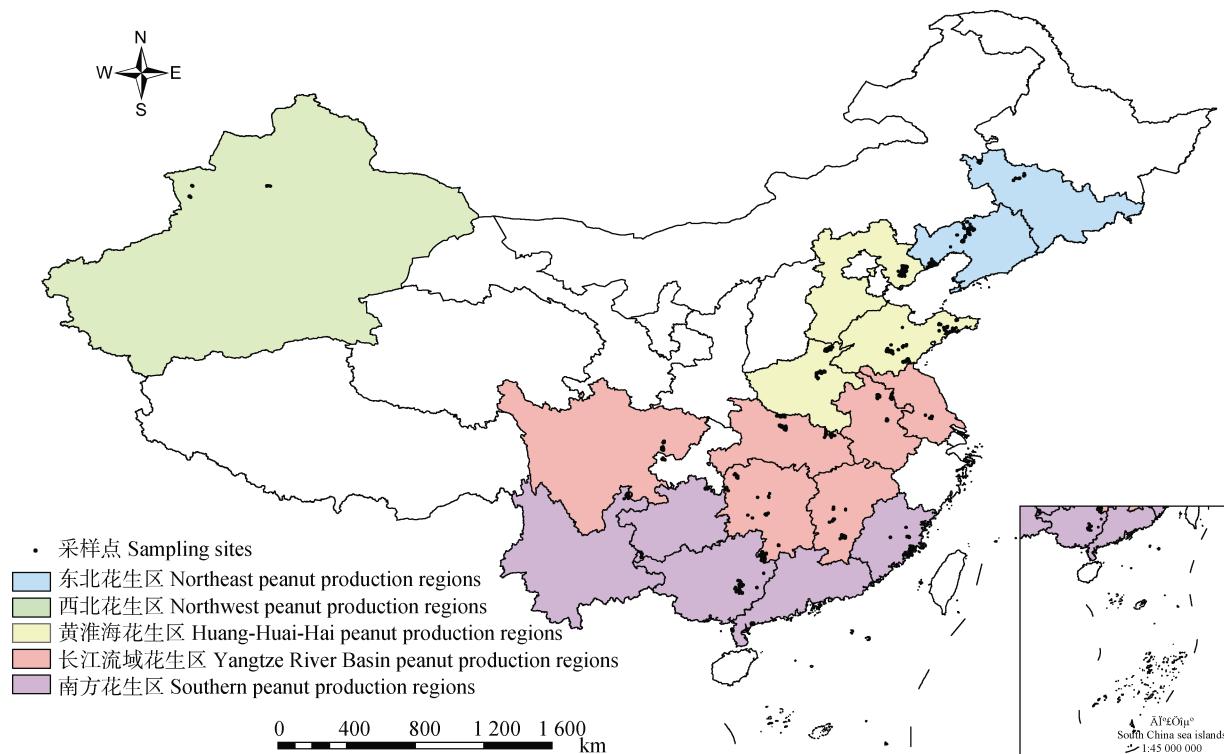
1.2 土壤数据获取与分析

2022 年 2—9 月, 在花生整地施肥播种前, 选取当地有代表性的花生田, 采用 GPS 定位, 按“S”形 5 点采样法, 采集花生田 0~20 cm 耕层土壤, 挑出根系、秸秆、石块等杂物, 5 个点的土壤捏碎、充分混匀为一个土壤样品, 保留 2 kg, 风干、过 1 mm 和 0.149 mm 筛, 用于测定土壤养分含量。

土壤样品测定了能够较好反映土壤肥力水平的 6 大指标, 包括 pH、有机质(OM)、全氮(TN)、碱解氮(AN)、有效磷(AP)和速效钾(AK)含量。采用鲍士旦^[10]常规分析方法进行测定, 其中 pH 采用 pH 计测定(水土质量比 2.5:1), 有机质采用重铬酸钾容量法—外加热法测定, 全氮采用全自动凯氏定氮法测定, 碱解氮采用碱解扩散法测定; 中性和石灰性土壤有效磷采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定, 酸性土壤采用 0.03 mol·L⁻¹ NH₄F-0.025 mol·L⁻¹ HCl 浸提—钼锑抗比色法测定; 速效钾采用 1 mol·L⁻¹ NH₄OAc 浸提—火焰光度法测定。土壤类型和土壤质地栅格数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心—土壤分中心(<http://soil.geodata.cn>)。

1.3 数据处理与分析

参考前人研究^[11-13]和全国第二次土壤普查的土壤养分含量分级标准, 本研究将土壤酸碱度和养分指标丰缺情况划分为 6 个等级(表 1), 其中 pH I~VI 级分别代表强碱性、碱性、中性、酸性、强酸性、极强酸性, 土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量 I~VI 级分别代表极丰、丰、中等、稍缺、缺和极缺。



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2020) 4630 的标准地图制作，底图无修改，下同。Note: The figure was drawn according to the standard map (No. GS (2020) 4630) downloaded from the Standard Map Service website of the Ministry of Natural Resources. The base map was not modified. The same below.

图 1 土壤采样点分布
Fig. 1 Distribution of soil sampling sites

表 1 土壤 pH 及养分各指标分级标准

Table 1 Standards for classification of soil pH and nutrients

分级 Grade	pH	OM / (g·kg ⁻¹)	TN / (g·kg ⁻¹)	AN / (mg·kg ⁻¹)	AP / (mg·kg ⁻¹)	AK / (mg·kg ⁻¹)
I	>8.5	>40	>2.0	>150	>40	>200
II	7.5~8.5	30~40	1.5~2.0	120~150	20~40	150~200
III	6.5~7.5	20~30	1.0~1.5	90~120	10~20	100~150
IV	5.5~6.5	10~20	0.75~1.0	60~90	5~10	50~100
V	4.5~5.5	6~10	0.5~0.75	30~60	3~5	30~50
VI	<4.5	<6	<0.5	<30	<3	<30

注：OM，有机质；TN，全氮；AN，碱解氮；AP，有效磷；AK，速效钾，下同。I~VI代表按照前人研究和第二次土壤普查划分的土壤 pH、OM、TN、AN、AP 和 AK 的级别。Note: OM, Organic matter; TN, Total nitrogen; AN, Alkaline nitrogen; AP, Available phosphorus; AK, Available potassium. The same below. The grades I~VI represent the classification levels of soil pH and OM, TN, AN, AP, and AK based on previous studies and the Second National Soil Survey of China.

采用 R4.1.2 软件对所有数据进行统计分析，在“psych”程序包中使用 describe() 函数对数据进行描

述性统计分析，在“agricolae”程序包中使用单因素方差分析 (One Way ANOVA) 和多重比较 (duncan.test

方法) 函数分别对不同耕作措施、种植方式和产量水平下花生种植土壤 pH 及养分含量数据进行方差分析和差异显著性检验 ($P < 0.05$)，不同土壤类型和质地下 pH 和养分含量数据标准化按 $[x - \text{mean}(x)] / \text{sd}(x)$ ，其中 x 为原始数据，mean 为平均值，sd 为标准差。采用 ArcMap 10.8 制作土壤 pH 及养分空间分布图，采用 OriginPro 2021 绘制土壤 pH 和土壤养分丰缺状况等级比例图和雷达图。

2 结 果

2.1 我国花生典型种植区土壤 pH 状况及其空间分布

我国花生典型种植区土壤 pH 平均为 6.38，呈双峰型分布，范围在 4.24~9.17，变异系数为 21.16% (表 2, 图 2a)。不同区域土壤 pH 存在差异，西北花生区土壤 pH 均值为 8.42，呈碱性；黄淮海花生区土壤 pH 均值为 6.75，呈中性；东北、长江流域、南方花生区土壤 pH 均值分别为 6.01、6.21、6.07，呈酸性。图 3a 为我国花生典型种植区土壤 pH 分级状况。整体而言，我国花生典型种植区土壤 pH 样点主要以Ⅳ(5.5~6.5)和Ⅴ(4.5~5.5)级为主，其所占比例分别为 26.76% 和 34.31%。就不同区域而言，东北、长江流域和南方花生产区土壤 pH 样点主要以Ⅳ(酸性)和Ⅴ(强酸性)级水平居多，两个等级共占比例分别为 70.86%、66.87% 和 71.93%；黄淮海花生产区土壤 pH 等级分布广泛，在Ⅰ(>8.5)、Ⅱ(7.5~8.5)、Ⅳ(5.5~6.5) 和Ⅴ(4.5~5.5) 水平均有分布，土壤样点所占比例分别为 26.87%、21.64%、19.40% 和 20.90%；西北花生产区土壤 pH 均集中在Ⅰ和Ⅱ级(>7.5)，两个等级土壤样点所占比例分别为 60.98% 和 39.02%。我国花生产区在不同酸碱度土壤上均有分布，花生生长的碱性土壤主要分布在黄淮海的河南省和西北产区的新疆维吾尔自治区等地，而东北、长江流域和南方花生产区土壤主要呈酸性(图 4a)。

2.2 我国花生典型种植区土壤有机质含量及其空间分布

我国花生典型种植区土壤有机质平均为 $15.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，呈单峰型正态分布，范围在 $3.04 \sim 34.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，变异系数为 39.14% (表 2, 图 2b)。

不同区域土壤有机质存在差异，南方花生产区有机质含量最高，均值为 $18.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，其次是长江流域 ($15.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、西北 ($14.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和黄淮海 ($13.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 花生产区，东北花生产区最低 ($13.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。图 3b、图 4b 为我国花生典型种植区土壤 OM 分级状况和分布状况。整体而言，我国花生典型种植区土壤 OM 等级分布主要在Ⅲ级~Ⅴ级，土壤 OM 丰富、中等和缺乏的比例分别占 1.27%、20.10% 和 78.62%，说明我国花生种植区土壤有机质含量主要处于偏低水平。就不同区域而言，东北产区有机质含量缺乏的比例占 93.38%，中等占 6.62%，辽宁省的有机质含量高于吉林省，为 $11.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ；黄淮海产区有机质含量缺乏 ($<20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的比例占 94.78%，中等 ($20 \sim 30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 占 5.22%，不同省份中河南省 ($12.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 有机质含量较低；长江流域产区有机质含量缺乏的比例 76.51%，中等占 22.29%，丰富 ($>30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 仅占 1.20%，不同省份中土壤有机质含量以湖南省 ($21.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 最高，四川省 ($9.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 最低；南方产区有机质含量缺乏的比例占 52.63%，中等占 43.42%，丰富占 3.95%，不同省份中土壤有机质含量以云南省 ($26.28 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 最高，贵州省 ($15.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 最低；西北产区有机质含量缺乏的比例占 80.49%，中等占 19.51%，不存在土壤有机质丰富含量的样点。可见，东北和黄淮海产区有机质缺乏比例明显高于西北、长江流域和南方产区。

2.3 我国花生典型种植区土壤全氮含量及其空间分布

我国花生典型种植区土壤全氮含量平均为 $1.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，呈单峰型正态分布，范围在 $0.12 \sim 3.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，变异系数为 47.52% (表 2, 图 2c)。不同区域土壤全氮含量存在差异，南方花生产区全氮含量最高，均值为 $1.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，其次是长江流域 ($1.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、西北 ($0.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和东北 ($0.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 花生区，黄淮海 ($0.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 花生区最低。图 3c、图 4c 为我国花生典型种植区土壤 TN 分级和分布状况。整体而言，我国花生典型种植区土壤 TN 等级主要分布在Ⅲ级~Ⅴ级，土壤 TN 含量丰富、中等和缺乏的比例分别占 14.61%、24.90% 和 60.49%，可见，我国花生种植区土壤全氮含量主要处在中等偏下水平。就不同区域而言，东北产区全氮含量缺乏的比例占 73.51%，中等占 26.49%，辽宁省

($0.79 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和吉林省土壤全氮含量 ($0.95 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 均较低; 黄淮海产区全氮含量缺乏的比例占 87.68%, 中等占 11.57%, 河南省、山东省和河北省土壤全氮含量均较低, 范围为 $0.76\sim0.79 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 长江流域产区全氮含量缺乏的比例占 53.92%, 中等占 25.90%, 丰富占 20.18%, 不同省份中土壤全氮含量以湖南省 ($1.98 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最高, 四川省 ($0.79 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最低; 南方产区全氮含量缺乏的比例占 28.07%, 中等占 37.28%, 丰富占 34.65%, 不同省份中土壤全氮含量以云南省 ($1.58 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最高, 广东省 ($0.95 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最低; 西北产区全氮含量缺乏的比例占 68.29%, 中等占 29.27%, 丰富仅占 2.44%。可见, 黄淮海、东北和西北产区土壤全氮缺乏比例明显高于长江流域和南方产区。

2.4 我国花生典型种植区土壤碱解氮含量及其空间分布

我国花生典型种植区土壤碱解氮含量平均为 $104.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 呈单峰型正态分布, 范围在 $7.30\sim339.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 44.63% (表 2, 图 2d)。不同区域土壤碱解氮含量存在差异, 长江流域花生产区土壤碱解氮含量最高, 均值为 $128.97 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其次是南方 ($109.91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、东北 ($94.77 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和黄淮海 ($80.16 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 花生产区, 西北 ($70.88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 花生产区最低。图 3d、图 4d 为我国花生典型种植区土壤 AN 分级和空间分布状况。整体而言, 我国花生典型种植区土壤 AN 等级在 I 级~VI 级均有分布, 丰富、中等和缺乏的比例分别占 30.00%、26.27% 和 43.73%。就不同区域而言, 东北产区土壤碱解氮缺乏的比例占 56.25%, 中等占 24.48%, 丰富占 19.27%, 吉林省碱解氮含量 ($98.80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 高于辽宁省 ($93.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); 黄淮海产区土壤碱解氮含量缺乏的比例占 68.28%, 中等占 18.66%, 丰富占 13.06%, 不同省份中土壤碱解氮含量以山东省 ($100.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最高, 河南省 ($59.99 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最低; 长江流域产区土壤碱解氮含量缺乏的比例 25.90%, 中等占 24.70%, 丰富占 49.40%, 不同省份中土壤碱解氮含量以江苏省 ($162.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最高, 四川省 ($100.14 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最低; 南方产区土壤碱解氮含量缺乏的比例占 30.26%, 中等占比 39.04%, 丰富占 30.70%, 云南、广西、广东、福建 4 个省区土壤碱解氮含量相近, 分布范围为 $102.18\sim105.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 西北产区土壤碱解氮含量缺乏的比

例占 75.61%, 中等占 21.95%, 丰富占 2.44%。可见, 长江流域和南方花生区土壤碱解氮中等偏上比例高于东北、黄淮海和西北花生产区。

2.5 我国花生典型种植区土壤有效磷含量及其空间分布

我国花生典型种植区土壤有效磷含量平均为 $39.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 呈偏态型分布, 范围在 $1.34\sim147.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 78.24% (表 2, 图 2e)。不同区域土壤有效磷含量存在差异, 东北花生产区有效磷含量最高, 均值为 $62.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其次是黄淮海 ($39.36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、南方 ($38.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和长江流域 ($32.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 花生产区, 西北 ($24.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 花生产区最低。图 3e、图 4e 为我国花生典型种植区土壤 AP 分级和空间分布状况。整体而言, 我国花生典型种植区土壤 AP 等级主要分布在 I 级~III 级, 土壤有效磷丰富、中等和缺乏的比例分别占 68.14%、18.73% 和 13.14%。就不同区域而言, 东北产区有效磷含量缺乏的比例占 0.66%, 中等占 7.95%, 丰富占 91.39%, 以辽宁省最高, 吉林省最低; 黄淮海产区有效磷含量缺乏的比例占 7.83%, 中等占 22.39%, 丰富占 69.78%, 不同省份中土壤有效磷含量以河北省 ($50.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最高, 河南省 ($33.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最低; 长江流域产区有效磷含量缺乏的比例占 20.48%, 中等占比 24.10%, 丰富占 55.42%, 不同省份中土壤有效磷含量以江西省 ($55.51 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最高, 四川省 ($13.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最低; 南方产区有效磷含量缺乏的比例占 14.91%, 中等占 11.84%, 丰富占 73.25%, 不同省份中土壤有效磷含量以福建省 ($54.68 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最高, 云南省 ($15.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最低; 西北产区有效磷含量缺乏的比例占 24.39%, 中等占 29.27%, 丰富占 46.34%。可见, 东北、黄淮海花生产区土壤有效磷中等偏上比例高于长江流域、南方和西北花生产区。

2.6 我国花生典型种植区土壤速效钾含量及其空间分布

我国花生典型种植区土壤速效钾含量平均为 $126.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 呈单峰型正态分布, 范围在 $9.30\sim328.47 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 47.49% (表 2, 图 2f)。不同区域土壤速效钾含量存在差异, 西北花生产区速效钾含量最高, 均值为 $186.51 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其次是长江流域 ($134.88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、东北 ($127.44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和南方 ($124.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 花生产区, 黄淮海

($109.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 花生产区最低。图 3f、图 4f 为我国花生典型种植区土壤 AK 分级和空间分布状况。整体而言, 我国花生典型种植区土壤 AK 等级主要分布在Ⅲ级和Ⅳ级, 土壤速效钾丰富、中等和缺乏的比例分别占 27.45%、33.92% 和 38.63%。说明我国花生种植区有 61.37% 的样点土壤速效钾处在中等偏上水平。就不同区域而言, 东北产区速效钾含量缺乏比例占 31.79%, 中等占 37.75%, 丰富占 30.46%, 吉林省 ($160.62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 土壤速效钾含量高于辽宁省 ($111.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); 黄淮海产区土壤速效钾含量缺乏比例占 45.90%, 中等占 39.55%, 丰富占 14.55%, 不同省份中土壤速效钾含量河南省

($116.92 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最高, 河北省 ($100.66 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最低; 长江流域产区速效钾含量缺乏比例占 37.35%, 中等占 29.82%, 丰富占 32.83%, 不同省份中土壤速效钾含量安徽省 ($210.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最高, 江西省 ($91.56 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最低; 南方产区速效钾含量缺乏比例占 42.10%, 中等占 32.46%, 丰富占 25.44%, 不同省份中土壤速效钾含量广西壮族自治区 ($155.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最高, 广东省 ($61.77 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最低; 西北产区速效钾含量缺乏比例占 7.32%, 中等占 24.39%, 丰富占 68.29%。可见, 西北产区土壤速效钾中等偏上的比例明显高于东北、长江流域、南方和黄淮海产区。

表 2 我国花生典型种植区土壤养分含量描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of soil nutrient contents in the typical regions of peanut production in China

产区 Producing areas	指标 Index	pH	OM / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	TN / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	AN / ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	AP / ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	AK / ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
NE	范围 Range	4.33~8.63	4.52~26.86	0.38~1.40	39.42~155.42	9.33~146.05	59.00~246.28
	均值 Mean	6.01	13.17	0.84	94.77	62.22	127.44
	变异系数 CV/%	16.97	32.19	25.00	29.06	56.38	33.95
HHH	范围 Range	4.24~9.17	4.07~25.76	0.25~1.59	7.30~201.55	3.00~142.49	29.00~245.26
	均值 Mean	6.75	13.26	0.78	80.16	39.36	109.02
	变异系数 CV/%	22.96	28.58	26.92	43.40	74.57	37.06
YRB	范围 Range	4.46~8.86	3.25~34.46	0.27~2.46	23.65~339.76	1.46~143.91	26.33~319.46
	均值 Mean	6.21	15.32	1.06	128.97	32.64	134.88
	变异系数 CV/%	21.58	40.99	49.06	41.92	91.88	48.71
S	范围 Range	4.51~8.43	3.04~34.21	0.12~3.42	9.80~253.29	1.34~147.46	9.30~328.47
	均值 Mean	6.07	18.52	1.35	109.91	38.43	124.38
	变异系数 CV/%	15.65	37.58	43.70	36.26	69.03	56.33
NW	范围 Range	7.83~9.06	5.62~23.60	0.28~1.60	26.70~123.00	3.00~67.50	79.00~326.00
	均值 Mean	8.42	14.7	0.85	70.88	24.69	186.51
	变异系数 CV/%	3.21	34.97	36.47	35.82	68.53	35.52
全国 Total	范围 Range	4.24~9.17	3.04~34.46	0.12~3.42	7.30~339.76	1.34~147.46	9.30~328.47
	均值 Mean	6.38	15.15	1.01	104.49	39.76	126.71
	变异系数 CV/%	21.16	39.14	47.52	44.63	78.24	47.49

注: NE: 东北; HHH: 黄淮海; YRB: 长江流域; S: 南方; NW: 西北。下同。Note: NE stands for Northeast China; HHH for Huang-Huai-Hai China; YRB for Yangtze River Basin China; S for Southern China; NW for Northwest China. The same below.

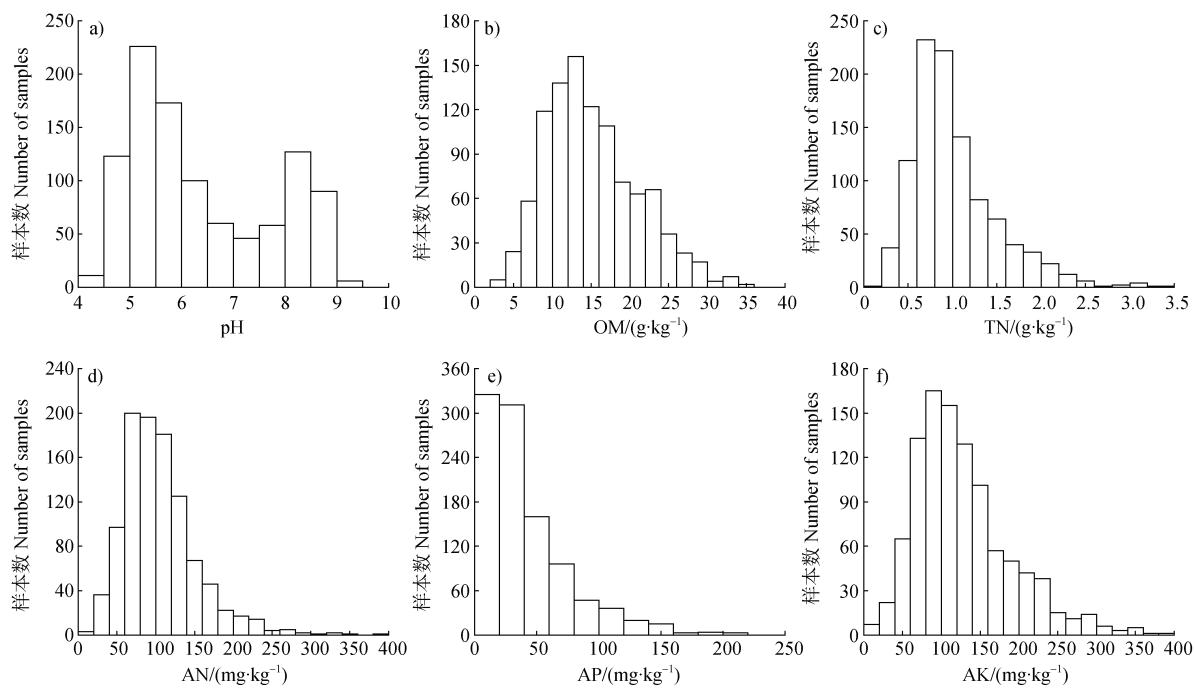
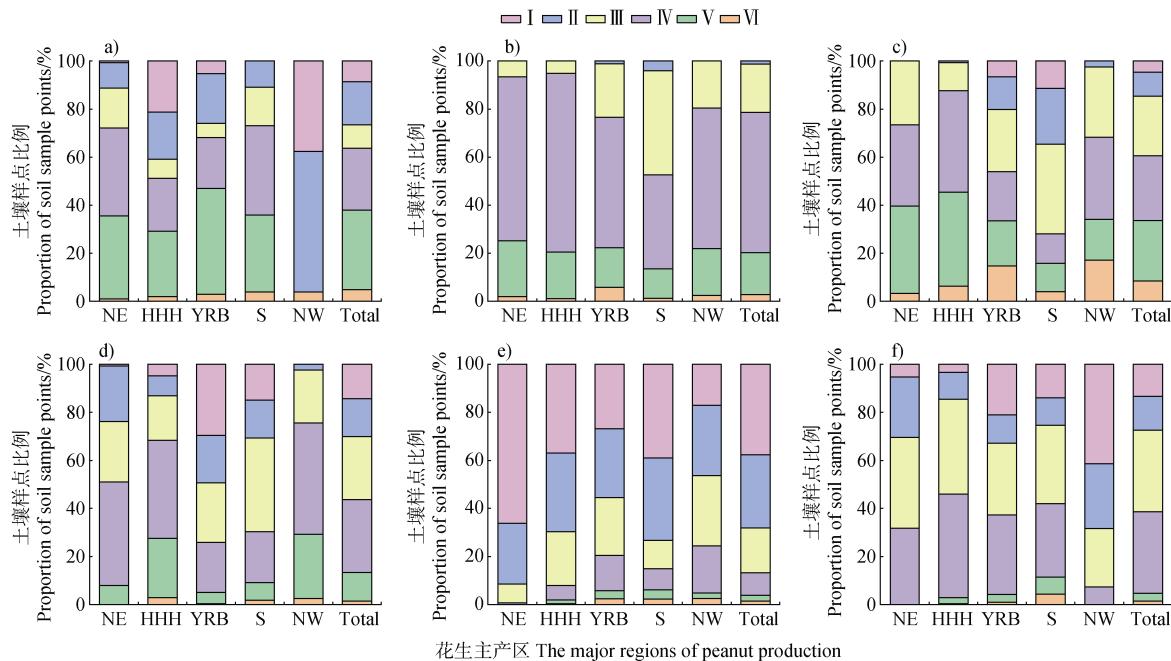


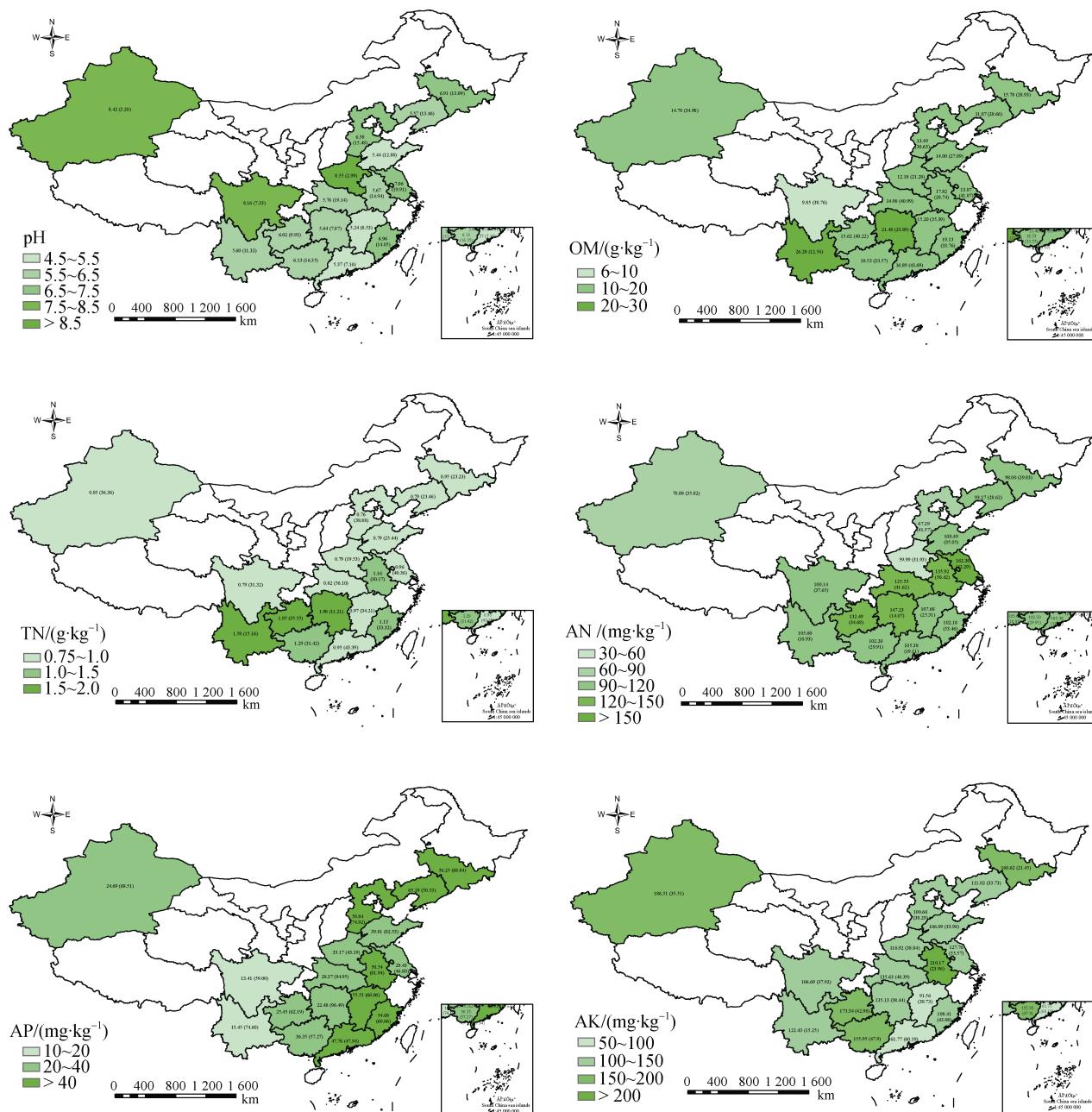
图2 土壤 pH (a) 及养分 (b. 有机质, c. 全氮, d. 碱解氮, e. 有效磷, f. 速效钾) 含量的直方图

Fig.2 Histogram of soil pH (a) and nutrient content (b. organic matter, c. total nitrogen, d. alkaline nitrogen, e. available phosphorus, f. available potassium)



注：I ~ VI 代表土壤 pH、OM、TN、AN、AP、AK 的分级级别（见表 1）。Note: The grades I to VI represent the classification levels of soil pH, OM, TN, AN, AP, and AK (Table 1).

图3 我国花生典型种植区土壤 pH (a) 及养分 (b. 有机质, c. 全氮, d. 碱解氮, e. 有效磷, f. 速效钾) 丰缺状况
Fig.3 Soil pH (a) and nutrients (b. organic matter, c. total nitrogen, d. alkaline nitrogen, e. available phosphorus, f. available potassium) deficiency status in typical peanut production regions in China



注：图中数据为 pH 或养分平均值，括号内为变异系数。Note: Data on the map mean the average of the pH, nutrients, and their coefficient of variation in the brackets.

图 4 我国花生典型种植区土壤 pH (a) 及养分 (b. 有机质, c. 全氮, d. 碱解氮, e. 有效磷, f. 速效钾) 空间分布
Fig. 4 Distribution of soil pH (a) and nutrients (b. organic matter, c. total nitrogen, d. alkaline nitrogen, e. available phosphorus, f. available potassium) content in typical peanut production regions in China

2.7 不同种植模式和产量水平下花生土壤 pH 和养分含量状况

不同种植方式和产量水平下花生种植土壤的养分特征(表3)可以看出,不同起垄方式影响养分含量,起垄种植土壤的碱解氮和有效磷含量显著高于平作,但其pH、速效钾和全氮含量显著低于平作。不同种植方式也

会影响土壤养分含量变化,夏播花生种植土壤的有机质、碱解氮、速效钾和全氮含量显著高于春播和麦套花生种植土壤,但其pH值显著低于麦套种植土壤。产量水平影响土壤养分含量,高产地块($\geq 4500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)土壤pH、碱解氮、有效磷含量高于低产地块($3000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),但其速效钾和全氮含量较低产地块低。

表3 不同耕作措施、种植方式和产量水平下花生种植土壤 pH 及养分含量

Table 3 Soil pH and nutrient content of peanuts under different tillage practices, planting modes, and yield level

影响因子 Influencing factors		pH	OM / (g·kg ⁻¹)	TN / (g·kg ⁻¹)	AN / (mg·kg ⁻¹)	AP / (mg·kg ⁻¹)	AK / (mg·kg ⁻¹)
耕作方式	平作 Flat planting	6.59a	15.58a	1.14a	100.72b	33.23b	133.41a
Tillage practice	起垄 Ridge planting	6.26b	14.89a	0.93b	106.8a	43.77a	122.6b
种植方式	春播 Spring planting	6.24b	14.98b	1.02a	102.39b	41.23a	125.10b
Planting mode	夏播 Summer planting	6.30b	16.81a	1.03a	127.89a	34.57b	141.75a
	麦套 Intercropping with wheat	8.63a	12.32c	0.80b	60.95c	35.35ab	102.43c
产量水平	<3 000	6.2b	15.41a	1.02a	96.52b	34.61b	125.01ab
Yield level/ (kg·hm ⁻²)	3 000~4 500	6.18b	15.2a	1.06a	110.62a	41.7a	131.51a
	≥4 500	6.54a	14.14a	0.89b	102.63ab	43.69a	117.57b

注: 同列不同字母表示不同耕作、种植方式和产量水平下花生土壤养分指标差异显著 ($P<0.05$) ; 两种耕作方式的比较采用独立样本的 t 检验。Note: The different letter in the same column means significant differences in soil nutrients between different tillage practices, planting modes, and yield levels by LSD test ($P<0.05$) ; the comparisons between two tillage practices were conducted by t -test of independent samples.

2.8 不同土壤类型和土壤质地下花生种植土壤 pH 和养分含量特征

不同土壤类型土壤 pH 存在明显差异, 灰钙土和潮土的 pH 在 7.5~8.5, 呈碱性, 风沙土、黑钙土和紫色土土壤 pH 呈中性, 砖红壤、黄褐土、黄棕壤、棕壤土壤 pH 在 5.5 以下, 呈强酸性, 其他土类的土壤 pH 在 5.5~6.5, 呈酸性。各土类的土壤 OM 含量相比, 黄壤土壤有机质含量最高, 为 $21.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其他土类的土壤有机质含量在 $10 \sim 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有机质含量稍缺。各土类的 TN 含量相比, 以石灰岩土 ($2.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 极丰富; 黄壤 ($1.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 丰富; 红壤、砂姜黑土、黄褐土、赤红壤、水稻土和砖红壤全氮含量在 $1.0 \sim 1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮含量中等; 黄棕壤和风沙土全氮含量小于 $0.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮含量缺乏。就各土类的 AN 含量而言, 砂姜黑土、黄褐土和石灰岩土的 AN 含量高于 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, AN 含量极丰富; 风沙土、褐土、灰钙土和潮土 AN 含量小于 $90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, AN 含量缺乏; 其他土壤类型 AN 含量在 $90 \sim 120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, AN 含量中等。各土类的 AP 含量均处于中等偏上水平, 其中黄壤、石灰(岩)土、紫色土 AP 含量在 $10 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 属有效磷含量中等土壤; 其他土类有效磷含量均大于 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 达丰富或极丰富水平。砖红壤 AK 含量小于 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾含量缺乏; 风沙土、黑钙土、

黄褐土、灰钙土、砂姜黑土、石灰(岩)土 AK 含量在 $150 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾含量丰富; 其他土类 AK 含量中等(图 5a)。

花生产区土壤质地共涉及粉壤、粉黏壤、壤土、砂壤、黏壤和黏土 6 种, 不同土质土壤 pH 和养分含量间也存在明显差异。土壤 pH 以粉壤最高, 壤土次之, 黏壤和粉黏壤最低; 土壤 OM 含量以粉黏壤最高, 黏壤次之, 粉壤最低; 土壤 TN 和 AN 含量以粉黏壤、黏壤和黏土高于粉壤、壤土和砂壤; 土壤 AP 以砂壤最高, 粉壤、黏壤、壤土次之, 粉黏壤和黏土较低; 土壤 AK 含量以黏土最高, 黏壤次之, 砂土最低(图 5b)。

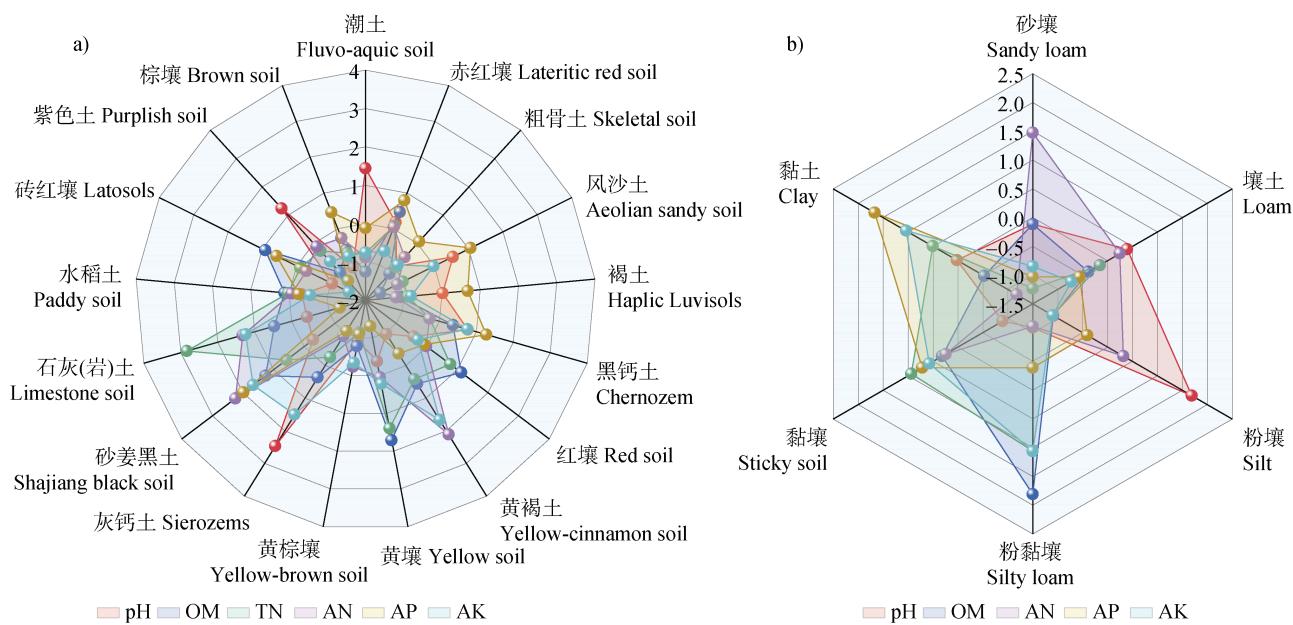
3 讨 论

3.1 我国花生主产区土壤养分丰缺状况及施肥建议

摸清主要作物种植土壤的肥力现状, 对于合理施肥提高作物产量具有重要作用^[14]。赵晴月等^[15]研究发现, 中国玉米主产区土壤 pH 介于 5.1~7.9, 均值为 6.8, 变异系数为 12.7%。任涛等^[11]研究发现, 我国冬油菜种植区 pH 介于 4.26~8.26, 均值为 6.04, 变异系数为 19.3%。本研究表明, 我国花生典型种植区土壤 pH 介于 4.24~9.17, 平均值为 6.38, 变异系数为 21.16% (表 2)。可见, 我国花

生典型种植区土壤 pH 高于冬油菜典型种植区，低于我国玉米主产区，这一方面是由于冬油菜主要种植在我国长江流域，玉米主要在长江流域以北，与成土母质有关；另一方面是花生氮循环过程和 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等盐基离子吸收不同于油菜和花生，导致其产酸量小于油菜，高于玉米^[16]。花生对土壤 pH 适应性强，在碱性、酸性和中性土壤上均可种植，不同区域之间土壤 pH 差异较大，其中西北花生产区土壤 pH 呈碱性，黄淮海花生产

区呈中性，东北、长江流域、南方花生产区土壤 pH 呈酸性，其可能原因在于长江中下游区和南方区降水量大，较高的降水量使土壤胶体上的交换性盐基大量淋失，氢离子取而代之，土壤酸度较低；东北产区降水集中、促进硅酸盐母质水解，干旱期则加剧盐基离子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) 流失，加上花岗岩等酸性母岩风化释放水解酸 (H^+ 、 Al^{3+})，形成酸性土壤^[17]；而西北区和黄淮海区干燥少雨，多为中性或碱性土壤。



注：不同土壤类型和质地的 pH 和养分含量数据按 $[x - \text{mean}(x)] / \text{sd}(x)$ 进行中心标准化后作图。Note: Data on pH and nutrient content of different soil types and textures were plotted after z-score normalization by $[x - \text{mean}(x)] / \text{sd}(x)$.

图 5 不同土壤类型 (a) 和土壤质地 (b) 下花生种植土壤养分含量

Fig. 5 Soil nutrient content of peanuts under different soil types (a) and soil textures (b)

土壤有机质是土壤养分的储藏库，其动态变化影响着土壤水盐运动状况和肥力特性^[18-19]。我国花生典型种植区土壤有机质含量为 $15.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，远低于测土配方施肥土壤基础养分数据集 (2005—2014) 结果 $24.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[5]，这表明我国花生产区土壤有机质含量普遍缺乏，这一方面由于我国花生大部分种植在土壤贫瘠的中低产田土壤上，另一方面与我国传统的土壤清耕管理、不施或少施有机肥有关^[20]。因此，在我国花生典型种植区，应增施农家肥和秸秆还田以提高土壤有机质含量。杨帆等^[21]研究指出秸秆还田是我国大部分地区土壤有机质含量增加的最主要原因。受水热条件和成土母质的影响^[22-23]，

本研究表明我国花生种植区土壤有机质呈现显著空间分异特征 (图 4b)，其中南方产区土壤有机质含量最高，长江中下游产区次之，东北、西北和黄淮海产区土壤有机质含量整体处于较低水平。这种空间异质性成因可从环境条件与人为管理两方面解析：一是，南方产区降水充沛，且土壤黏粒含量高，可加速有机肥与秸秆的腐殖化进程，促进有机质的吸附和固定；长江中下游产区虽维持有机物料投入，但降水强度减弱导致腐解速率降低；而东北、西北和黄淮海产区花生主要种植在干旱少雨的风沙土上，不利于有机物料的腐解^[3]；二是，调研结果发现，不同产区有机肥施用比例差异很大，南方产

区有机肥施用用户占比达 22.4%，而东北产区仅 2.0%（表 4），这进一步解释了施肥差异对区域有机质变化的短期调控效应。基于上述原因，针对土壤有机

质偏低的东北区和黄淮海产区，有必要强化政策引导与技术推广，通过提升有机肥施用比例来改善耕层土壤结构，从而增强土壤保水蓄肥能力。

表 4 我国花生典型种植区有机肥施用情况

Table 4 Organic fertilizer application status in the typical regions of peanut production in China

产区 Producing areas	调查农户数 Number of surveyed farmers	有机肥施用农户数 Number of farmers applying organic fertilizer	施用有机肥的农户比例 Percentage of farmers applying organic fertilizer/%
NE	151	3	1.99
HHH	268	31	11.57
YRB	332	14	4.22
S	228	51	22.40
NW	41	2	4.87

土壤全氮、碱解氮、有效磷和速效钾是反映土壤供肥能力的重要指标。本研究结果显示，我国花生主产区耕层土壤全氮平均含量为 $1.01 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，85.39%的样本处于中低等级水平（表 2，图 3c）。该结果与土壤有机质密切相关，已有研究证实区域尺度上土壤全氮的变异性约有 50% 可被土壤有机碳解释^[24]。本研究也发现，土壤全氮含量区域分布差异与土壤有机质较为一致，表现为南方花生区最高，其次是长江流域，西北、东北和黄淮海花生区较低（表 2）。各区域氮肥推荐用量与土壤供氮能力密切相关，南方花生种植区土壤有机质含量高、供氮能力强，可适当降低氮肥投入量；而西北、东北和黄淮海花生产区土壤有机质与氮含量偏低，可适当增加有机肥施用量，从而通过优化施氮量来提高作物氮肥利用率和产量。施用磷肥可显著增加土壤有效磷含量，1980—2007 年，我国土壤有效磷含量从 $7.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增至 $24.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，上升了 $17.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[25]，因此，如何提高磷肥利用率是当前我国亟需解决的重要问题。本研究发现，我国花生典型种植区土壤有效磷为 $39.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，86.87%以上的土壤处于中等丰富水平（表 2，图 3e），这与过量施用磷肥及复合肥的带入有关。各花生产区土壤有效磷含量也达到丰富水平，尤其是东北花生区（表 2）。因此，在花生生产中应适当减少化学磷肥的投入，以提高磷肥利用率，降低土壤有效磷的积累及土壤磷素对环境的风险^[26]。

我国花生典型种植区土壤速效钾含量为

$126.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，略高于测土配方施肥土壤基础养分数据集（2005—2014）全国速效钾含量 $120.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[5]，但土壤速效钾缺乏的比例仍高达 38.63%（图 3f）。因此，在推行秸秆还田，提高土壤钾素肥力的同时，仍应针对土壤速效钾含量状况，在速效钾含量缺乏的地区适当施用钾肥，尤其是在花生产量不断提高的情况下，合理施用化学钾肥对花生优质高产具有重要作用^[27-28]。花生产区土壤速效钾含量区域差异明显，其中西北产区最高（ $186 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），长江流域、东北和南方地区次之（ $124.38\sim134.88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），黄淮海产区最低，但仍维持 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上（表 2）。值得注意的是，柳开楼等^[29]研究发现全国及各区域旱作耕地的土壤速效钾含量均超过 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，且普遍高于本研究结果。其原因可能源于两方面因素：一是柳开楼等^[29]研究数据源自实施标准化施肥管理的全国耕地质量监测平台，该监测平台通过长期农作物秸秆还田提升了土壤钾素积累；二是，本研究区域花生秸秆多被移出农田作为饲料利用，导致外源钾补给不足，最终造成土壤速效钾水平相对偏低。本研究中黄淮海花生产区的土壤速效钾含量低于其他几个花生产区（表 2），其原因可能是该产区花生主要种植在砂质土壤上，土壤保肥性差，钾素淋洗和流失较多。

3.2 我国花生主产区土壤养分丰缺状况的影响因子

不同种植方式显著影响土壤肥力特征，张晗等^[30]通过分析 16 582 个农田耕层土壤样品数据发现，水旱轮作土壤有机碳和 TN 含量高于旱作，而

旱作土壤全磷含量则高于水旱轮作。本研究将花生种植方式按整地方法划分为平作和起垄2种,按播种时期划分为春播、夏播和麦套3种,发现花生起垄种植土壤的碱解氮和有效磷含量显著高于平作(表3),这与以往研究结果^[31-32]一致:垄作较平作能够降低土壤紧实度和硬度,有效提高土壤肥力状况。有研究表明春播和麦套种植可通过优化土壤结构,增加细菌和放线菌数量,提高土壤微生物生物量碳及土壤呼吸速率,改善土壤微环境,促进土壤养分分解和有效化^[32],但本研究发现,夏播花生种植土壤的有机质、碱解氮、速效钾和全氮含量显著高于春播和麦套花生种植土壤(表3),这可能是由于春播、麦套花生产量显著高于夏播花生^[33],植株从土壤中吸收带走了较多的养分。产量水平影响土壤养分含量,本研究中有机质、全氮和速效钾含量较低的地块作物产量较高(表3),这可能与种植花生品种养分需求量低、土壤结构良好、土壤水热条件适宜以及土壤养分元素协调性较好等因素有关。土壤养分含量受土壤质地影响,砂质土的养分少,通气性好,有机质易分解,保肥性弱;黏质土含矿质养分丰富,缓效或无效养分多,通气性差,有机质易积累,保肥性强。有研究认为,土壤质地越重,其有效磷和速效钾含量越高^[11, 34]。本研究结果发现,砂质和壤土质地组相比,黏壤和黏土质地组的pH较低,有机质和全氮含量较高,碱解氮、速效钾含量较高,但有效磷含量较低(图5),这可能是由于黏壤和黏土质地组的土壤黏粒含量较高,黏粒对带正电荷的离子态养分(如NH₄⁺、K⁺)有强大的吸附能力,保肥性较好,使其不致被雨水和灌溉水淋洗损失,这与以往研究结果^[34]不完全一致,可能原因在于本研究是基于全国尺度上开展的研究,黏质土壤多分布在酸性较强的我国南方地区,土壤中铁离子和铝离子活性较高,易与磷酸根和亚磷酸离子形成难溶性铁磷酸盐(Fe-P)和铝磷酸盐(Al-P)。综上所述,我国不同花生产区土壤养分受产量水平、土壤质地、耕作及种植方式等因素的影响,因此,在制定不同花生产区的施肥策略时,除考虑土壤养分含量外,还应综合考虑现实产量、高产需求、需肥特性、种植方式(水旱轮作、旱作等)以及气候、地形等因素。单一的土壤养分有机质或氮、磷、钾等指标不能充分反映土壤综合肥力状况,未来还需根据土壤物理、化学和生物学

指标,结合花生的需肥特性、产量水平等因素,采用模糊综合评价法、主成分分析法等^[35-36]多指标评价方法开展区域土壤肥力综合评价研究,以构建花生种植土壤新的肥力分级标准,为花生精准施肥提供更科学的指导。

4 结 论

中国花生主产区耕层土壤pH范围为4.24~9.17,平均为6.38,黄淮海和西北产区偏碱性,东北、长江流域和南方花生产区偏酸性。土壤有机质含量平均为15.15 g·kg⁻¹,有机质缺乏的样点比例为78.62%,花生生产应增加有机肥的施用。我国花生主产区土壤全氮、碱解氮含量平均分别为1.01 g·kg⁻¹、104.49 mg·kg⁻¹,全氮和碱解氮缺乏的样点比例分别为60.49%和43.72%。东北、黄淮海和西北花生区碱解氮缺乏比例高,花生生产应适量增加氮用量;长江流域和南方花生产区土壤碱解氮较为丰富,应控制氮肥投入,以提高氮素利用率并减少环境污染。我国花生典型种植区土壤有效磷平均为39.76 mg·kg⁻¹,86.87%以上的土壤处于中等丰富水平,花生生产中应严格控制磷肥投入,以提高磷肥利用率,减少土壤磷素的环境风险。西北产区速效钾含量较丰富,建议合理控施钾肥,东北、长江流域、南方和黄淮海产区土壤钾素丰缺状况差异较大,建议根据土壤钾素状况进行钾肥管理。

致 谢 诚挚地感谢国家花生产业体系25个综合试验站站长及其团队科研人员在调研信息收集及取样过程中给予的大力支持与帮助。

参考文献 (References)

- [1] National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Statistical yearbook of China 2002 (No.21) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2002. [中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2002(总第 21 期)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2002.]
- [2] Liao B S. A review on progress and prospects of peanut industry in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2020, 42 (2): 161—166. [廖伯寿. 我国花生生产发展现状与潜力分析[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42 (2): 161—166.]
- [3] Yang L P, Guo H H, Zhu Z L, et al. Ecological suitability

- evaluation of peanut plantation in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41 (3): 461—468. [杨丽萍, 郭洪海, 朱振林, 等. 中国花生生态适宜性评价研究[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41 (3): 461—468.]
- [4] National Soil Survey Office. China soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998. [全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.]
- [5] National Agricultural Technical Extension and Service Center. Data set of soil basic nutrients for formula fertilization by soil testing: 2005—2014[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015. [全国农业技术推广服务中心. 测土配方施肥土壤基础养分数据集: 2005—2014[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.]
- [6] Zhang J Y, Fan C G, Rao W P, et al. Investigation and evaluation of soil nutrients in main peanut producing areas of Jiangxi Province[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2023, 35 (5): 41—44. [张静燕, 范呈根, 刘文平, 等. 江西省花生主产区土壤养分状况调查评价研究[J]. 江西农业学报, 2023, 35 (5): 41—44.]
- [7] Shen Y T, Suo Y Y, Zhang X, et al. Evaluation of soil nutrient status and suggestions for fertilization in main peanut production areas of Henan Province[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48 (9): 67—73. [沈云亭, 索炎炎, 张翔, 等. 河南省花生主产区土壤养分状况评价及施肥改进建议[J]. 河南农业科学, 2019, 48 (9): 67—73.]
- [8] Guo K, Li H M, Jiang X G, et al. Soil fertility evaluation in Xiangyang summer peanut area based on ArcGIS and fuzzy mathematical method[J]. Journal of Peanut Science, 2022, 51 (4): 60—69. [郭凯, 李红梅, 蒋相国, 等. 基于 ArcGIS 和模糊数学法的夏花生产区土壤肥力评价——以襄阳市为例[J]. 花生学报, 2022, 51 (4): 60—69.]
- [9] Dong J C. Research on soil nutrient status survey and formula fertilization of peanut in Fuxin Region of Liaoning Province[J]. Horticulture & Seed, 2016, 36 (2): 64—67. [董敬超. 辽宁省阜新地区土壤养分状况调查与花生配方施肥研究[J]. 园艺与种苗, 2016, 36 (2): 64—67.]
- [10] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [11] Ren T, Guo L X, Zhang L M, et al. Soil nutrient status of oilseed rape cultivated soil in typical winter oilseed rape production regions in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53 (8): 1606—1616. [任涛, 郭丽璇, 张丽梅, 等. 我国冬油菜典型种植区域土壤养分现状分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53 (8): 1606—1616.]
- [12] Xu X J, Zhang Y C, Wang J D, et al. Soil nutrient status and soil fertility evaluation of farmland in three main sweet potato regions in China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021 (5): 27—33. [许仙菊, 张永春, 汪吉东, 等. 中国三大薯区土壤养分状况及土壤肥力质量评价[J]. 中国土壤与肥料, 2021 (5): 27—33.]
- [13] Cong R H, Zhang Z, Zheng L, et al. Soil nutrients and pH in rapeseed planting areas in the middle reaches of the Yangtze River based on GIS[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (5): 1213—1224. [丛日环, 张智, 郑磊, 等. 基于 GIS 的长江中游油菜种植区土壤养分及 pH 状况[J]. 土壤学报, 2016, 53 (5): 1213—1224.]
- [14] Su B, Liu R, Lu Z, et al. Mapping key soil properties of cropland in a mountainous region of southwestern China[J]. Agronomy, 2024, 14 (7): 1417.
- [15] Zhao Q Y, Xu S J, Zhang W S, et al. Spatial regional variability and influential factors of soil fertilities in the major regions of maize production of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53 (15): 3120—3133. [赵晴月, 许世杰, 张务帅, 等. 中国玉米主产区土壤养分的空间变异及影响因素分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53 (15): 3120—3133.]
- [16] Zhou H Y, Xu M G, Cai Z J, et al. Quantitative analysis of driving-factors of soil acidification in Qiyang County, Hunan Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52 (8): 1400—1412. [周海燕, 徐明岗, 蔡泽江, 等. 湖南祁阳县土壤酸化主要驱动因素贡献解析[J]. 中国农业科学, 2019, 52 (8): 1400—1412.]
- [17] Huang C Y. Soil science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [18] Gerke J. The central role of soil organic matter in soil fertility and carbon storage[J]. Soil Systems, 2022, 6 (2): 33.
- [19] Cotrufo M F, Lalonde J M. Chapter One Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration[J]. Advances in Agronomy, 2022, 172: 1—66.
- [20] Xu M G, Lu C A, Zhang W J, et al. Situation of the quality of arable land in China and improvement strategy[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37 (7): 8—14. [徐明岗, 卢昌艾, 张文菊, 等. 我国耕地质量状况与提升对策[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37 (7): 8—14.]
- [21] Yang F, Xu Y, Cui Y, et al. Variation of soil organic matter content in croplands of China over the last three decades[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54 (5): 1047—1056. [杨帆, 徐洋, 崔勇, 等. 近 30 年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J]. 土壤学报, 2017, 54 (5): 1047—1056.]
- [22] Lal R. Soil organic matter and water retention[J]. Agronomy Journal, 2020, 112 (5): 3265—3277.
- [23] Xie E Z, Zhang Y X, Huang B, et al. Spatiotemporal variations in soil organic carbon and their drivers in

- southeastern China during 1981—2011[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205: 104763.
- [24] Liu Z P, Shao M G, Wang Y Q. Spatial patterns of soil total nitrogen and soil total phosphorus across the entire Loess Plateau region of China[J]. *Geoderma*, 2013, 197: 67—78.
- [25] Li H, Huang G, Meng Q, et al. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review[J]. *Plant and Soil*, 2011, 349 (1/2): 157—167.
- [26] Yan Z, Liu P, Li Y, et al. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: Overfertilization, soil enrichment, and environmental implications[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42 (4): 982—989.
- [27] Yang Q R, Li L T, Zhang X, et al. Effects of potassium application dosage on yield, quality and light temperature physiological characteristics of summer peanut[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57 (7): 1335—1349. [杨启睿, 李岚涛, 张潇, 等. 施钾对夏花生产量、品质及光温生理特性的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57 (7): 1335—1349.]
- [28] Sun W, Zhang H Y, Wei Q Q, et al. Effects of foliar spraying of sorbitol chelated potassium on peanut yield and rhizosphere soil microbial community[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61 (4): 1099—1110. [孙伟, 张欢洋, 魏倩倩, 等. 叶面喷施山梨醇螯合钾对花生产量及根际土壤微生物群落的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61 (4): 1099—1110.]
- [29] Liu K L, Du J X, Ma C B, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of soil potassium in main dry-farming grain arable land of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 (3): 673—684. [柳开楼, 都江雪, 马常宝, 等. 中国主要旱作粮食耕地土壤钾素的时空演变特征[J]. 土壤学报, 2023, 60 (3): 673—684.]
- [30] Zhang H, Ouyang Z C, Zhao X M. Effects of different land use types on ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in farmland soils in Jiangxi Province, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39 (3): 939—951. [张晗, 欧阳真程, 赵小敏. 不同利用方式对江西省农田土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39 (3): 939—951.]
- [31] Yang D, Liu Y, Wang Y, et al. Effects of soil tillage, management practices, and mulching film application on soil health and peanut yield in a continuous cropping system[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 570924.
- [32] Si X Z, Zhang X, Mao J W, et al. Effects of interaction of tillage method with soil conditioner on soil physicochemical properties and peanut yield[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2015, 44 (11): 41—44. [司贤宗, 张翔, 毛家伟, 等. 耕作方式与土壤调理剂互作对土壤理化性质及花生产量的影响[J]. 河南农业科学, 2015, 44 (11): 41—44.]
- [33] Lin Y J, Li X D, Zhou L Y, et al. Effects of different peanut planting patterns on field soil microenvironment and pod yield[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24 (3): 131—135. [林英杰, 李向东, 周录英, 等. 花生不同种植方式对田间土壤微环境和产量的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24 (3): 131—135.]
- [34] Zhang S R, Huang Y F, Li B G, et al. Temporal-spatial variability of soil available phosphorus and potassium in the alluvial region of the Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2003, 9 (1): 3—8. [张世熔, 黄元仿, 李保国, 等. 黄淮海冲积平原区土壤速效磷、钾的时空变异特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9 (1): 3—8.]
- [35] Huang J, Han T F, Shen Z, et al. Spatiotemporal variation of fertility quality of Chinese paddy soil based on fuzzy method in recent 30 years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 (2): 355—366. [黄晶, 韩天富, 申哲, 等. 基于模糊数学 (Fuzzy) 法的中国水稻土肥力质量近 30 年的时空变化特征[J]. 土壤学报, 2023, 60 (2): 355—366.]
- [36] Fan Y N, Yao L P, Qu M K, et al. Yield-based soil fertility quality assessment and constraint factor-based zoning of paddy soil-A case study of Jinxian County[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (5): 1157—1169. [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.]

(责任编辑: 陈荣府)