

长期施肥下红壤养分指标阈值研究

包耀贤¹, 包斌强²

(1. 中化环境修复(山东)有限公司 北京 100000; 2. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 土壤养分和作物产量间呈S形而非线性生长效应, 养分指标的阈值是科学施肥和土壤肥力综合评价之关键。近30年的长期定位试验因大量的养分和产量梯度数据而成为养分指标阈值研究的最佳载体。本研究基于江西进贤红壤性稻田长期定位化肥、有机肥和旱地化肥试验监测数据, 采用频率累积曲线、生长效应曲线和专家成果借鉴等多种方法, 系统研究了有机质(OM)、全氮(TN)、速效氮(AN)、全磷(TP)、速效磷(AP)、全钾(TK)、速效钾(AK)和pH等8项指标阈值。结果表明, 养分指标与作物产量呈显著或极显著生长效应关系, 并得出相应模拟方程, 评价指标阈值: OM 30 g/kg、TN 2.0 g/kg、AN 200 mg/kg、TP 1.2 g/kg、AP 20 mg/kg、TK 14 g/kg、AK 100 mg/kg、pH 4.5(下)/6.5(上), 可供红壤区参考施肥和土壤肥力评价。

关键词: 长期施肥; 红壤; 土壤养分; 作物产量; 阈值

中图分类号: S572 **文献标识码:** A **文章编号:** 0488-5368(2024)05-0068-06

Threshold Values of Nutrient Indexes for Red Soil under Long-term Fertilization

BAO Yaoxian¹, BAO Binqiang²

(1. Sinochem Environmental Remediation (ShanDong) Co., LTD, Beijing 100000, China;

2. College of Forestry of Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The relationship between soil nutrients and crop yields is S-shaped and non-linear, thus, identifying threshold value of nutrient index is crucial for scientific fertilization and comprehensive evaluation of soil fertility. With extensive gradient data on nutrients and yields over the past 30 years, long-term fertilization experiments have emerged as optimal platforms for studying nutrients threshold. Based on the monitoring data from long-term fertilization experiments conducted with fertilizer and manure in reddish paddy soil, and with fertilizer in red upland soil at Jinxian county, Jiangxi province, we used different methods including frequency accumulation curve, growth effect curve and experts achievement reference to systematically determine the threshold values of organic matter(OM), total nitrogen (TN), available nitrogen (AN), total phosphorus(TP), available phosphorus(AP), total potassium(TK), available potassium(AK) and pH value. The results showed significant or extremely significant growth-effect relationship (obtained corresponding simulation equations) between nutrient indexes and crop yields. The determined thresholds were OM 30g/kg, TN 2.0g/kg, AN 200mg/kg, TP 1.2g/kg, AP 20mg/kg, TK 14g/kg, AK 100mg/kg and pH 4.5 (low) and 6.5 (high), respectively. These findings can serve as a reference for fertilization practices and soil fertility assessments in red soil region.

Key words: Long-term fertilization; Red soil; Soil nutrient; Crop yield; Threshold value

收稿日期: 2023-11-09 修回日期: 2024-02-15

第一作者简介: 包耀贤(1975-), 男, 副研究员, 博士后, 主要从事土壤改良、修复和评价工作。

土壤养分与作物生长效应呈 S 型曲线^[1~3],即施肥到一定程度,作物产量不再明显提高时对应的土壤养分含量是其阈值(临界值)^[4~6]。农田土壤通过施肥满足作物生长和提高作物产量,但超阈值持续过量施肥会加速养分累积、造成肥料浪费甚至污染,即土壤养分阈值是决定施肥的重要依据。土壤肥力或质量评价时,表达评价指标与作物生长效应间的数学关系的隶属函数是核心^[1~3],而确定评价指标阈值直接关系到评价结果的可靠性。国内外,Janzen 和 Howard 从产量角度指出多数土壤 SOC 适宜值为 20 g/kg^[7,8];唐旭^[6]对昌平、郑州和杨凌长期定位试验的小麦—玉米体系速效磷阈值进行研究;鲁剑巍^[4]确定了湖北速效钾阈值;骆伯胜^[9]人为给出林地砖红壤 8 项指标阈值。整体看,确定评价指标阈值大多是根据土壤普查、作物产量及养分数据人为确定。按理,科学确定评价指标阈值必须基于大量长期定位且有一定梯度的作物产量和对应指标含量数据,基于此,本研究以江西进贤 3 个长期定位试验为载体采用不同方法研究评价指标阈值至关重要且具现实指导意义。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

稻田红壤化肥、旱地红壤化肥、稻田红壤有机肥长期定位试验均设在位于江西省进贤县张公镇的江西省红壤研究所(116°20'24" N,28°15'30" E),为典型低丘红壤区,海拔 25~30 m;属亚热带季风气候,年均温 17.6℃,≥10℃积温 5 528℃;年降雨 1 785 mm,3~6 月降雨量占全年 60%以上,年蒸发量 1 800 mm,干湿季明显;无霜期 282 d,日照时数 1 950 h。试验初,<0.001mm 粘粒含量分别为稻田(1981 年)24.1%、旱地(1986 年)32.2%。

1.2 长期定位试验设计

(1)稻田红壤化肥长期定位试验:始于 1981 年,红壤性水稻土。小区 46.67 m²,9 处理 3 重复:设 CK、N、P、K、NP、NK、NPK、2NPK(2 倍氮磷钾)和 NPKM(氮磷钾+有机肥)。每季 667 m² 施肥量:N(尿素)6 kg,P₂O₅(钙镁磷肥)3 kg,K₂O(氯化钾)5 kg;有机肥 1 500 kg(早稻紫云英+晚稻猪粪)。1981~1986 年采用一年稻—稻—油、二年稻—稻—紫云英轮作制,1986 年后稻—稻—冬闲制。

(2)旱地红壤化肥长期定位试验:始于 1986 年,红壤。小区 22.22 m²,9 处理 3 重复:CK、N、P、K、NP、NPK、2NPK、M 和 NPKM。每季亩施肥量:N(尿素)4 kg,P₂O₅(钙镁磷肥)2 kg,K₂O(氯

化钾)4 kg,有机肥(猪粪)1 000 kg。早玉米—晚玉米—冬闲轮作制。

(3)稻田红壤有机肥长期定位试验:始于 1981 年,潴育型水稻土。小区 60 m²,9 处理 3 重复:CK、紫云英 1 500(早稻)、紫云英 3 000(早稻)、紫云英 1 500+猪粪 1 500(早稻)、紫云英 1 500+猪粪 1 500(晚稻)、紫云英 1 500+猪粪 1 500(晚稻)+鲜稻草 300(冬盖紫云英)、紫云英 1 500+稻草 300(冬盖紫云英)、紫云英 1 500(早稻)+稻草 300(晚稻)、N₆P₃K₅(施 N 6 kg、P₂O₅ 3 kg、K₂O 5 kg)。早稻—晚稻—紫云英轮作。

1.3 采样、测定、数据分析

11 月晚稻收获后采集 0~20 cm 耕层土处理后测^[10]:有机质—重铬酸钾容量法;全氮—半微量凯氏法;全磷—NaOH 熔融钼锑抗比色法;全钾—NaOH 熔融火焰光度法;速效氮—碱解扩散法;速效磷—NaHCO₃ 浸提钼锑抗比色法;速效钾—NH₄OAC 浸提火焰光度法;pH—酸度计电位法。

相对产量:其它处理水稻总产与“紫 1 500+猪粪 1 500 晚+稻草 300+冬盖紫”处理水稻总产(最高)比值。

使用 Excel、DPS 和 Origin 软件对数据进行处理、计算、绘图、统计分析。

2 结果与分析

2.1 有机质阈值

结合农业生产实际和专家经验,多以作物相对产量达最高点 90%~95%时所对应指标作为最优肥力标准^[6,11]。为此,用 DPS 软件模拟有机肥试验水稻相对产量(Y)与有机碳 OC(X)间呈显著 Gauss(高斯)模型(图 1),即随 OC 含量增至一定程度,相对产量增势明显趋缓,Y 达到 90%时 SOC 含量为 17.7 g/kg(OM 为 30.5 g/kg),模拟方程:

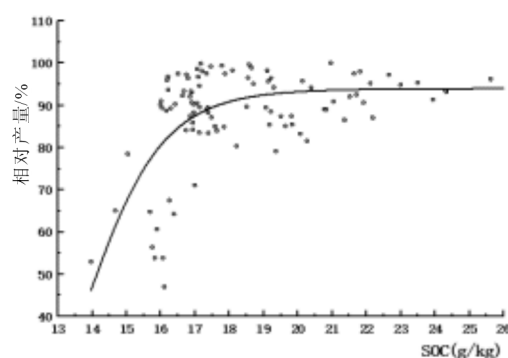


图 1 有机肥试验水稻总产对 SOC 的生长效应

$$Y = 3.902 \times (1 - 30.196 \times e^{-0.021X^2})$$

$F=25.7, p=0.0001, R^2=0.349$

另用 Origin 软件模拟有机肥试验水稻相对产量(Y)与 SOC(X)间呈显著 S 形 Hill(希尔)生长模型(图 2),水稻相对产量达 90%时对应 OC 为 17.6 g/kg(OM 为 30.4 g/kg),符合农业生产实际,模拟方程:

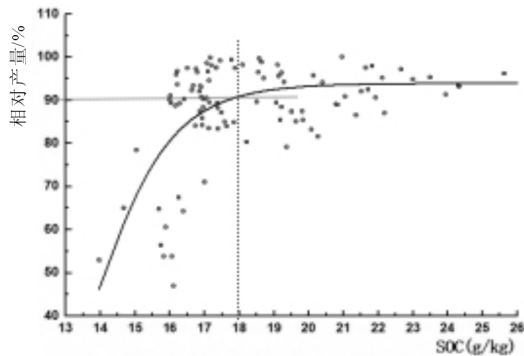


图 2 有机肥试验水稻相对总产对 SOC 的响应

$$Y=94.05+X^{\frac{13.41}{13.99+X^{13.41}}}$$

$F=2891.4, p=0.0001, R^2=0.340$

综上两种模型,水稻产量与 OM 均呈显著生长效应关系,OM 阈值分别 30.5 g/kg 和 30.4 g/kg,对于同一土壤和作物,相近模型的 OM 阈值可取整归一,故确定 30 g/kg 为研究区水稻产量不再明显增加时的 OM 阈值。

2.2 氮素阈值

全氮(TN)含量虽受氮肥或有机肥影响,但主取决于土壤母质而相对稳定,加之作物产量与 TN 含量间相关性往往不好,难用 S 型生长模型模拟确定其生长效应阈值,可借鉴其与有机质高度相关性综合确定其阈值。根据频率累积曲线法,选择曲线突变处作为等级界线以划分养分指标等级^[11],综合图 3(有机肥试验)和图 4(稻田化肥试验)显示, TN 含量在 1.6 g/kg 和 2.0 g/kg 附近有较明显拐点,故分: $TN < 1.6$ (低)、 $1.6 < TN < 2.0$ (中)和 $TN \geq 2.0$ (高),即 $TN > 2.0$ g/kg 时属高氮肥力,增加 TN 含量对作物增产效应不再明显。

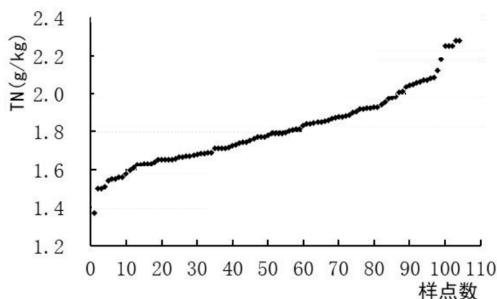


图 3 有机肥试验 TN 频率累积曲线

同时,选择 OM 和 TN 含量梯度相对较大的

有机肥长期试验数据模拟得知二者呈极显著线性正相关($Y_{OM}=15.143X_{TN}+2.7892, R^2=0.77$),将 OM 阈值 30 g/kg 带入上述方程得 TN 约 1.8 g/kg。综合确定 TN 阈值为 2.0 g/kg。

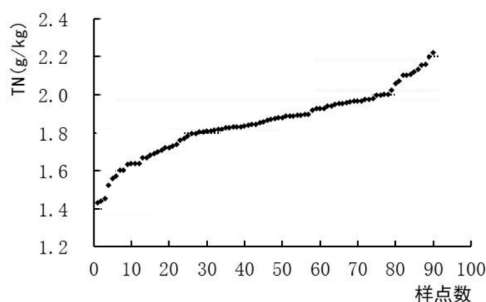


图 4 稻田化肥试验 TN 频率累积曲线

速效氮(AN)超一定量时作物增产停滞,再追加氮素会致土壤酸化和水质污染。研究区 AN 含量梯度大(99~242 mg/kg),但与产量相关性差,与以往结果类似^[11]。从图 5 中 3 个长期定位试验可知,AN 在 130 mg/kg 和 200 mg/kg 时拐点明显,即 $AN \geq 200$ mg/kg 时,AN 增加对作物增产效应不再明显,确定 200 mg/kg 为 AN 阈值,也符合以往大部分土壤肥力评价时参考数据。

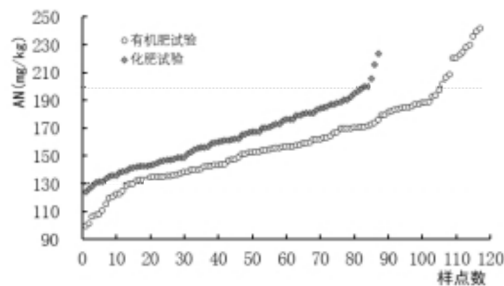


图 5 有机肥试验和化肥试验 AN 频率累积曲线

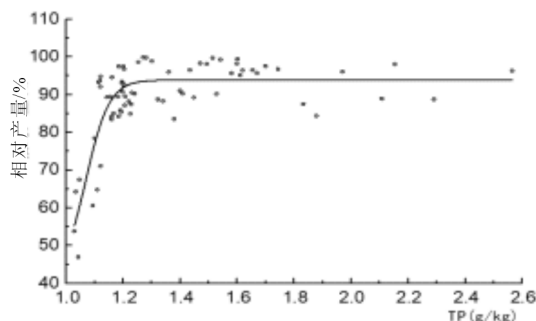


图 6 有机肥试验水稻对 TP 的 Boltzmann 生长模型

2.3 磷素阈值

全磷(TP)和速效磷(AP)对全面体现磷素水平缺一不可^[10],体现土壤磷库的 TP 主受土壤母质、成土作用和施肥影响,而体现作物可吸收利用磷素水平的 AP 在 TP 含量低时往往供应不足,在 TP 含量高时因磷的难溶性也未必供应充足。Origin 模拟有机肥试验得知,作物相对产量(Y)与 TP 含量(X)间呈极显著 S 型 Boltzmann(波尔兹曼)生

长曲线关系(图6),Y增至92左右%时TP含量增至1.2 g/kg,模拟方程:

$$Y = \frac{-52.331}{1 + e^{(X-1.07)/0.04}} + 93.923$$

$$F = 3484.64, p = 0.0001, R^2 = 0.661$$

同样,通过DPS软件模拟有机肥试验发现,Y与TP间也呈极显著S型Gauss生长模型(图7),相对产量增至92%时,对应TP含量为1.2 g/kg,与Boltzmann模型模拟结果一致,模拟方程:

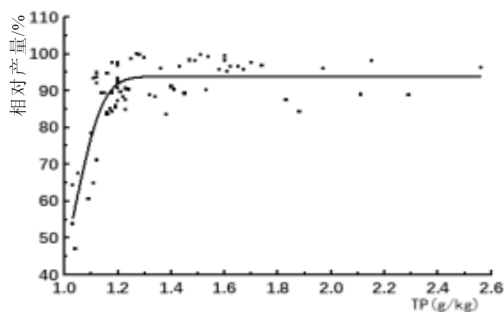


图7 有机肥试验水稻对TP的Gauss生长模型

$$Y = 94.424 \times (1 - 384.451 \times e^{-6.415X^2})$$

$$F = 69.684, p = 0.0001, R^2 = 0.675$$

模型发现有机肥试验中,水稻相对产量Y与AP间呈极显著S型Gauss生长模型(图8),相对产量增至约92%时,AP含量趋稳于15 mg/kg左右而可作为其阈值,模拟方程:

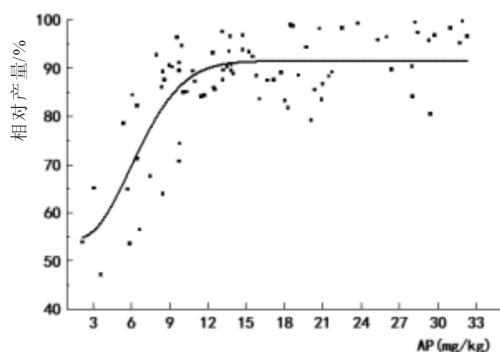


图8 有机肥试验水稻相对产量对AP的响应

$$Y = 91.754 \times (1 - 0.474 \times e^{-0.020X^2})$$

$$F = 54.789, p = 0.0001, R^2 = 0.587$$

同样,从CK、NK、NPK、2NPK、NPKM处理的化肥水稻试验中模拟发现,相对产量Y与AP间呈极显著S型Boltzmann生长关系(图9),相对产量达90%时AP阈值为20 mg/kg,模拟方程:

$$Y = \frac{-53.257}{1 + e^{(X-7.903)/5.122}} + 94.226$$

$$F = 409.560, p = 0.0001, R^2 = 0.490$$

上述有机肥和化肥试验中,AP阈值分别为

15 mg/kg和20 mg/kg。粘质土比壤质和砂质土更易固定磷素而需施用更多磷肥才能达到相同AP水平。研究区土壤为红壤母质,整体较粘,水稻土为重壤土,旱地为轻粘土,依此应选择20 mg/kg作AP阈值更合适。

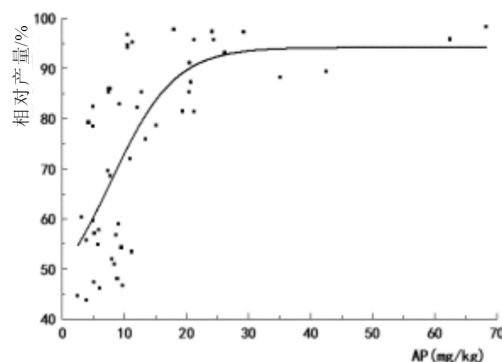


图9 化肥试验水稻相对产量对AP的响应

2.4 钾素阈值

北方成土母质均一旦干旱,全钾(TK)含量(15~22 g/kg)变幅较小,南方成土母质不均且多雨,TK含量(0.8~33 g/kg)变幅较大。图10中3个长期定位试验统计显示:TK在12 g/kg和14 g/kg附近有明显拐点,可分三个等级:TK<12(低)、12<TK<14(中)和TK≥14(高),即TK≥14 g/kg时为TK阈值。统计TK知,<12 g/kg占16%,12~14 g/kg占71%,≥14 g/kg占13%,即以14 g/kg为TK阈值涵盖了87%的信息差异,符合实情。

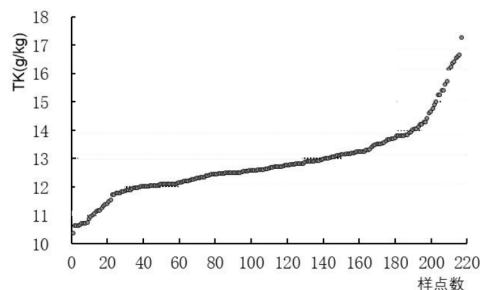


图10 有机肥和化肥试验TK频率累积曲线

一般AK含量在150 mg/kg时产量增加已不明显^[11]。图11水稻化肥试验显示,水稻总产(Y)与AK(X)间呈极显著Gauss生长效应,随AK增加总产增幅趋于稳定,产量达90%时AK阈值为100 mg/kg,方程:

$$Y = 11057.875 \times (1 - 1.012 \times e^{-0.000465X^2})$$

$$F = 23.965, p = 0.0001, R^2 = 0.461$$

2.5 pH阈值

土壤pH适中时,养分有效性较高,过酸过碱均不利于作物生长。从图12中3个长期定位试验

pH 频率累积曲线知 pH 在 5.2 和 6.3 处有明显突变点,统计 237 个样点 pH(5.00~6.65)可知, $pH \geq 6.3$ 和 $pH \leq 5.2$ 者各占 5%,而 $5.2 < pH < 6.3$ 者占 90%。

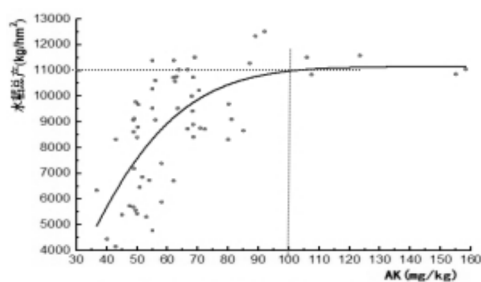


图 11 化肥试验水稻总产对 AK 的响应

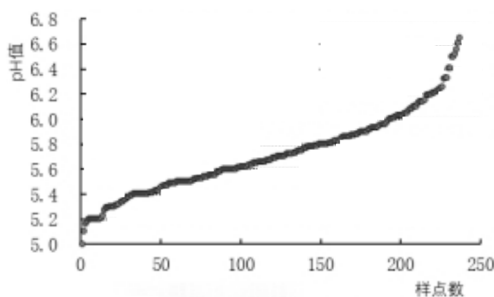


图 12 化肥和有机肥试验 pH 频率累积曲线

不同作物对酸害敏感性不同,研究区 $pH < 5.2$ 时仍有一定的作物生产量,但随 pH 降低明显减产。孙波^[12]等提出红壤水田、旱地和林地 pH 下阈值均为 4.5,上阈值为 5.5、6.5 和 6.5;吕晓男等^[13]和徐建明等^[11]建议红壤 pH 下和上阈值为 4.5 和 6.5。综上,确定研究区 pH 生长效应上和下阈值为 4.5 和 6.5。

3 讨论

有机质是决定土壤多功能表现的最重要部分,也是土壤肥力评价不可或缺的指标,因其与产量间相关性时好时差而难以确定其适宜值和极限值^[11]。Janzen 和 Howard 研究得出多数作物产量不再明显增加的 OM 阈值为 34 g/kg^[7,8],与本研究结果接近;在中国,有机质阈值类似研究仅从生产实践中总结而成,孟庆魁^[14]得出辽南地区高产稳产的棕壤耕层 SOM 上限拟定为 20 g/kg 为宜;蒋卫东等^[15]提出辽宁省表土有机质阈值分别为:棕壤 23 g/kg、褐土 20 g/kg、草甸土 25 g/kg、水稻土 30 g/kg、露天菜园土 35 g/kg 和保护地 45 g/kg,其水稻土 OM 阈值与此研究完全一致;孙波^[12]等也提出与本研究一致的红壤水田 OM 阈值,而旱地、林地为 20 g/kg 和 50 g/kg。可见,对于不同土壤和作物,养分指标阈值各不同。本研究 SOM 30 g/kg 阈值是通过长期定位试验大量数据模拟

和验证所得,符合生产实际,可作为红壤区土壤肥力综合评价和施肥的依据。

受施氮肥或有机肥影响的氮素含量增加产量也增加成为不争事实,但全氮含量主要取决于土壤母质,这就决定了其含量梯度小而相对稳定的特性,速效氮含量虽然梯度大,但与全氮一样均与产量相关性差,难用 S 型曲线精确模拟其生长效应阈值^[11],在此情况下,运用频率累积曲线寻求明显突变点不失为一种有效方法^[16]。虽然通过施氮量与产量效应曲线或方程确定最高产量对应施氮量仍是推荐常用方法,但必须以前几年试验和不同梯度为基础,也会受年际间气候、田间管理等因素影响而在时和空适用性上受限^[16~18]。就所涉及玉米和水稻作物而言,梁效贵^[19]等得出华北地区玉米临界氮浓度变化曲线方程,吕茹洁^[20]等基于不同施氮水平下模拟幂函数得出江西宜春市常规稻和杂交稻适宜施氮量(kg/hm^2)分别为 160~200 和 200,类似本研究。在我国过量施氮和不合理施氮问题十分严重的当下^[16],必须确保施氮量至少不致地下水污染,而目前缺乏此类研究,特别在南方土壤本来偏酸条件下应特别注意少施氮肥而多施与氮素关系密切且可供氮的有机肥。

研究区 TP 与水稻相对产量均呈 Boltzmann 和 Guass 生长模型, $TP > 1.2 \text{ g}/\text{kg}$ 时产量明显趋稳,根据第二次全国土壤普查 TP 含量主要在 0.44~0.85 g/kg 间判断此阈值符合生产实际;研究区 TP 含量在 1.03~2.56 g/kg 间, $TP > 1.2 \text{ g}/\text{kg}$ 者占 56%,在实际生产中应减少磷肥用量,防止肥料浪费和环境破坏。无论酸性还是碱性土壤,AP 最能反映土壤对作物的供给水平。研究表明,AP 与作物产量间通常具有很好的相关性,可通过建立二者间模型确定其生长效应阈值,以此进行土壤肥力评价时计算隶属度值相当可靠^[6,11,21]。但因土壤磷素生长效应和环境效应的“拐点”与土壤组成等性质密切相关,目前并无适用于所有土壤类型的统一指标。唐旭^[6]基于北京昌平(褐潮土)、郑州(潮土)和杨凌(壤土)三个长期化肥试验数据得出玉米和小麦 AP 阈值分别为 20.7 mg/kg 和 21.7 mg/kg,虽然土壤和作物类型对 AP 阈值有一定影响,但与本研究 AP 阈值 20 mg/kg 研究结果相近;吕晓男^[13]等和徐建明^[11]等提出江西红壤 AP 阈值为 20 mg/kg,与本研究结果一致。我国太湖流域水稻土和南京市郊菜地 AP 转折点均在 25 mg/kg 左右^[22],从环境安全角度考虑,AP 达到 20 mg/kg 时已处于较明显富集状态^[11,17];孙波^[12]等提出红

壤水田、旱地和林地 AP 阈值为 10 mg/kg。综上,研究区 AP 阈值采用 20 mg/kg 符合农业生产实际。值得注意的是,研究区部分样点磷素已处于明显富集状态,多研究证实,AP 超过某临界点时,磷素从土壤向水体转移致负面效应明显增加^[22],应减施以防止其流失并保护地表和地下水体。

统计显示:研究区 AK \geq 100 mg/kg 占比仅 4%,一方面,研究区 AK 绝大部分还未到增产无效之程度,这与南方酸性土壤 AK 含量整体较低有关;一方面,说明以 100 mg/kg 为速效钾阈值进行土壤肥力评价能反映 96% 的绝大多数样点信息差异。鲁剑巍等^[4]对湖北省 10 多年 80 个油菜施钾试验得出粘质土和轻质土 AK 阈值为 84 mg/kg 和 103 mg/kg;孙波^[12]等提出红壤水田、旱地和林地 AK 阈值为 100 mg/kg,与本研究一致;徐建明^[11]等提出 AK 阈值为 150 mg/kg。综上,确定研究区 AK 阈值为 100 mg/kg 符合研究区实情和评价需要。

4 结论

基于近 30 年长期定位试验监测数据,模拟显示养分指标与作物产量间呈显著或极显著 S 形生长曲线,并得出相应模拟方程,再综合频率累积曲线和专家成果借鉴,得出养分评价指标阈值可作为研究区科学施肥和土壤肥力综合评价关键依据,同时可供全国施肥和肥力评价参考。养分指标阈值:OM 30 g/kg、TN 2.0 g/kg、AN 200 mg/kg、TP 1.2 g/kg、AP 20 mg/kg、TK 14 g/kg、AK 100 mg/kg 和 pH4.5(下)/6.5(上)。

参 考 文 献:

- [1] 王建国,杨林章,单艳红. 模糊数学在土壤质量评价中的应用研究[J]. 土壤学报, 2001,38(2):176-183.
- [2] 杨旭初,叶会财,李大明,等. 基于模糊数学和主成分分析的长期施肥红壤旱地土壤肥力评价[J]. 中国土壤与肥料,2018(3):79-84.
- [3] 包耀贤,肖晶晶,孙艳芳,等. 乌兰布和绿洲区农田土壤质量评价及演化[J]. 陕西农业科学,2022,68(5):73-80.
- [4] 鲁剑巍,陈防,余常兵,等. 油菜施钾效果及土壤速效钾临界值初步判断[J]. 中国油料作物学报, 2003, 25(4):107-112.
- [5] Aulakh M. S, Garg A. K, Kabba B. S. Phosphorus accumulation, leaching and residual effects on crop yields from long-term applications in the subtropics [J]. Soil Use and Management. 2007(23):417-427.
- [6] Xu Tang, Yibing Ma, Xiyang Hao, et al. Determining critical values of soil Olsen-P for maize and winter wheat from long-term experiments in China[J]. Plant Soil, 2009(323):143-151.
- [7] Janzen H H, Larney F J, Olson B M. Soil quality factors of problem soils in Alberta[C]. Proceeding of the Alberta Soil Science Workshop. 1992,17-28.
- [8] P. J. A. Howard, D. M. Howard. Use of organic carbon and loss-on-ignition to estimate soil organic matter in different soil types and horizons[J]. Biology and Fertility of Soils, 1990,9(4):306-310.
- [9] 骆伯胜,钟继洪,陈俊坚. 土壤肥力数值化综合评价研究[J]. 土壤, 2004,36(1):104-106.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京:中国农业出版社, 1999.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 吕晓男,陆允甫,王人潮. 浙江低丘红壤肥力数值化综合评价研究[J]. 土壤通报, 2000, 31(3):107-110.
- [14] 孟庆魁. 辽南地区棕壤有机质平衡的初步研究[M]. 土壤肥力研究论文集二,1986,62-69.
- [15] 蒋卫东,颜丽,关连珠. 辽宁省主要农田土壤有机质状况及调控对策[J]. 土壤肥料,2003(1):121-127.
- [16] 张亦涛,王洪媛,雷秋良,等. 农田合理施氮量的推荐方法[J]. 中国农业科学, 2018,51(15):2 937-2 947.
- [17] XIA Y Q, YAN X Y. Ecologically optimal nitrogen application rates for rice cropping in the Taihu Lake region of China [J]. Sustainability Science, 2012 (7):33-44.
- [18] CUI Z L, CHEN X P, ZHANG F S. Development of regional nitrogen rate guidelines for intensive cropping systems in China[J]. Agronomy Journal, 2013(105):1 411-1 416.
- [19] 梁效贵,张经廷,周丽丽,等. 华北地区夏玉米临界氮稀释曲线和氮营养指数研究[J]. 作物学报, 2013,39(2):292-299.
- [20] 吕茹洁,商庆银,陈乐,等. 基于临界氮浓度的水稻氮素营养诊断研究[J]. 植物营养与肥料学报 2018, 24(5):1 396-1 405.
- [21] Colomb B, Debaeke P, Jouany C, et al. Phosphorus management in low input stockless cropping systems: crop and soil responses to contrasting P regimes in a 36-year experiment in southern France [J]. Eur J Agron, 2007(6):154-165.
- [22] 张焕朝,张红爱,曹志洪. 太湖地区水稻土磷素径流流失及其 Olsen 磷的“突变点”[J]. 南京林业大学学报,2004, 28(5):6-10.