

北方小麦种植区土壤养分变化规律及其对产量的影响研究

王丽氏

呼伦贝尔农垦集团有限公司（上库力农牧场有限公司），内蒙古自治区呼伦贝尔市，022257；

摘要：本研究以北方小麦种植区为研究对象，通过多点长期定位监测与田间试验相结合的方式，系统剖析土壤有机质、氮、磷、钾等关键养分的时空变异特征，精准明确其与小麦产量之间的定量关系。研究结果显示，华北平原潮土区土壤有机质含量较黄土高原黄绵土区高出42.3%，且0-20cm耕层的养分含量普遍比20-40cm土层高出30%以上；土壤碱解氮含量每提升10mg/kg，小麦产量平均可增加86.5kg/hm²。实践证明，对土壤养分进行合理调控能够使小麦产量提升15%-20%，该研究成果为北方小麦主产区的施肥管理工作提供了坚实的科学依据。

关键词：北方小麦种植区；土壤养分；时空变异

DOI：10.64216/3080-1508.25.06.029

引言

小麦作为北方地区的第一大粮食作物，其种植面积占全国总播种面积的43%，产量占比更是高达45%以上。土壤养分作为小麦生长不可或缺的核心物质基础，其供应能力直接决定着小麦的产量潜力——当土壤有机质含量低于10g/kg时，小麦产量会降低20%-30%；而有效磷含量不足5mg/kg时，小麦分蘖数将减少40%以上。

北方小麦主产区经过60余年的集约化种植，土壤养分状况已发生了深刻变化：华北平原部分农田由于长期过量施用磷肥，有效磷含量从1980年的8.2mg/kg攀升至2024年的35.6mg/kg；黄土高原区则因钾肥投入不足，速效钾含量较2000年下降了28.3%。这种养分失衡现象不仅制约着小麦产量的提升，还造成每年超300万吨化肥的浪费。

当前相关研究存在两方面局限：一是缺乏跨区域的长期对比数据，二是对养分与产量之间量化关系的研究不够深入。本研究通过整合1980-2024年的定位监测数据，首次建立起北方麦区土壤养分变化数据库，明确了关键养分的阈值范围（如有机质含量在15-20g/kg、碱解氮含量在80-120mg/kg时，小麦产量最佳），为精准施肥提供了量化依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

选取北方4个典型麦区作为研究对象，各区域基本情况如下：

华北平原潮土区：涵盖河南新乡、山东德州等产区，该区域年均温为13.5℃，年降水量620mm，土壤有机质

含量在12-18g/kg之间，实行冬小麦-夏玉米一年两熟制，小麦平均产量为6800kg/hm²。

黄土高原黄绵土区：包括陕西咸阳、甘肃平凉等地，年均温10.8℃，年降水量510mm，土壤有机质含量8-12g/kg，以冬小麦-休闲轮作为主要种植方式，小麦平均产量4200kg/hm²。

东北黑钙土区：集中在辽宁铁岭、吉林松原一带，年均温7.2℃，年降水量580mm，土壤有机质含量20-25g/kg，主要种植春小麦，平均产量5500kg/hm²。

汾渭平原褐土区：涉及山西临汾、陕西渭南等地，年均温12.6℃，年降水量550mm，土壤有机质含量10-15g/kg，采用冬小麦-夏大豆轮作模式，小麦平均产量5200kg/hm²。

1.2 试验设计与样品采集

在每个研究区域设置3个长期定位监测点（连续监测15年）和5个田间试验小区（面积为30m×20m）。试验共设5个处理：①不施肥（CK）；②单施氮肥（N）；③氮磷配施（NP）；④氮磷钾配施（NPK）；⑤氮磷钾+有机肥（NPKM），每个处理重复3次。

土壤样品分别在小麦拔节期和成熟期采集，采用“S”形布点法采集0-20cm、20-40cm土层的样品（共15个点混合为一个样品），使用环刀法测定土壤容重，铝盒法测定土壤含水量。小麦成熟后，在每个小区选取3个1m²样方进行测产，并调查穗数、穗粒数、千粒重等指标。

1.3 土壤养分测定方法

采用重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤有机质含量 (测定误差±0.2g/kg); 凯氏定氮法测定全氮含量 (误差±0.01g/kg); 碱解扩散法测定碱解氮含量 (误差±1mg/kg); 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定有效磷含量 (误差±0.5mg/kg); 乙酸铵浸提-火焰光度法测定速效钾含量 (误差±2mg/kg)。所有测定项目均做3次重复。

1.4 数据分析方法

运用SPSS26.0软件进行单因素方差分析(p<0.05), 采用Origin2021绘制养分变化曲线, 通过多元逐步回归建立“土壤养分-产量”模型:

$$Y=320.5+18.6X_1+8.7X_2+5.2X_3+3.8X_4 (R^2=0.86, p$$

<0.01)

(其中, Y为小麦产量 kg/hm²; X₁为有机质含量 g/kg; X₂为碱解氮含量 mg/kg; X₃为有效磷含量 mg/kg; X₄为速效钾含量 mg/kg)

2 结果与分析

2.1 北方小麦种植区土壤养分现状

2.1.1 区域间养分差异

由表1(北方小麦种植区不同区域土壤养分含量比较)可知, 东北黑钙土区的有机质含量最高, 达到22.3g/kg, 是黄土高原区的2.3倍; 华北平原区有效磷含量为31.6mg/kg, 显著高于其他区域; 汾渭平原油菜-小麦轮作区的速效钾含量比连作区高出18.7%。

表1 北方小麦种植区不同区域土壤养分含量比较

区域	有机质 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
华北平原潮土区	15.6±1.2a	98.5±5.3a	31.6±2.8a	126.3±6.5b
黄土高原黄绵土区	9.7±0.8c	65.2±4.1c	12.3±1.5c	108.7±5.2c
东北黑钙土区	22.3±1.5a	82.6±4.8b	20.5±1.9b	168.4±7.8a
汾渭平原褐土区	12.8±1.0b	76.3±4.5b	18.7±1.7b	132.5±6.1b

注: 同列不同小写字母表示差异显著 (p<0.05)

2.1.2 土层间养分分布

0-20cm耕层的有机质含量平均为15.1g/kg, 比20-40cm土层高出38.5%; 碱解氮的表层富集现象十分明显, 表层含量是下层的1.6倍; 有效磷在0-20cm土层累积显著, 占0-40cm土层总量的72.3%; 速效钾在上下层的差异较小, 仅相差12.7%。

2.2 土壤养分时空变化规律

2.2.1 时间变化趋势

1980-2024年的监测数据显示:

有机质: NPKM处理下, 有机质含量年均增加0.32g/kg, 显著高于NPK处理的0.15g/kg

碱解氮: NPK处理的碱解氮含量在2000-2010年达到峰值(112mg/kg), 之后由于施氮量的优化调整, 降至98mg/kg

有效磷: 所有施肥处理的有效磷含量均呈上升趋势, 其中NP处理在44年间累计增加28.7mg/kg

速效钾: N处理的速效钾含量年均下降1.2mg/kg, NPK处理的速效钾含量基本稳定在120-130mg/kg

3.2.2 空间变异特征

在县域尺度上, 土壤养分变异系数表现为: 有效磷(42.6%)>碱解氮(28.3%)>速效钾(21.5%)>有机质(18.7%)。华北平原区的养分空间分布较为均匀(变异系数<25%), 而黄土高原区由于受坡耕地的影响, 有效磷变异系数高达56.8%。

2.3 土壤养分对小麦产量的影响

2.3.1 养分与产量相关性

在土壤有机质含量10-20g/kg的范围内, 每增加1g/kg, 小麦产量可提升126kg/hm²; 碱解氮含量在80-120mg/kg时, 与小麦产量呈显著正相关(r=0.82); 有效磷的临界值为15mg/kg(低于此值时, 小麦产量会随磷含量的增加而显著提升); 速效钾含量在100-150mg/kg区间时, 能够稳定维持小麦高产。

2.3.2 不同施肥处理的产量效应

表2(北方小麦种植区不同施肥处理对小麦产量及构成因素的影响)显示, NPKM处理的小麦产量最高, 达到7236kg/hm², 较CK处理增产108.7%; NPK处理比NP处理增产12.3%, 这表明钾肥已成为北方麦区重要的增产因子; 有机肥配合施用可使小麦千粒重提高2.3g, 穗

粒数增加 3.5 粒。

表 2 北方小麦种植区不同施肥处理对小麦产量及构成因素的影响

处理	产量 (kg/hm ²)	穗数 (万/hm ²)	穗粒数 (粒)	千粒重 (g)
CK	3467±125e	423±18d	26.3±1.2d	38.5±0.8d
N	4892±156d	512±21c	29.6±1.5c	40.2±0.9c
NP	5863±182c	568±23b	32.4±1.7b	41.5±1.0b
NPK	6585±196b	592±25ab	33.8±1.8b	42.1±1.1b
NPKM	7236±215a	625±28a	36.1±1.9a	44.4±1.2a

2.3.3 主要限制因子

不同区域因土壤特性、气候条件和种植管理方式的差异,小麦生长的土壤养分限制因子存在明显不同,具体表现及影响如下:

黄土高原区的主要养分限制因子为有效磷(限制强度 32.6%),其次是碱解氮(限制强度 28.3%)。该区域有效磷含量平均仅为 12.3mg/kg,远低于北方麦区 18.5mg/kg 的平均水平。这主要是由于黄土高原土壤质地疏松,碳酸钙含量较高,磷素易与钙离子结合形成难溶性磷酸盐,导致有效磷含量低且有效性差。同时,该区域农业生产中存在“重氮轻磷”的施肥习惯,磷肥施用量长期不足,平均施磷量(以 P₂O₅ 计)仅为 55kg/hm²,不足华北平原区的 60%。有效磷缺乏会严重影响小麦的根系发育和能量代谢,使得小麦在苗期根系干重比适宜磷水平下降低 28%–35%,分蘖数减少 20%–25%,进而导致成穗率下降。而碱解氮限制主要源于该区域降水较少,氮素矿化速率慢,且部分地区氮肥施用时期不合理,基肥比例过高,后期易出现脱氮现象,导致小麦灌浆期叶片早衰,千粒重降低 8%–12%。

华北平原区的主要限制因子是速效钾(限制强度 21.5%),其次为有机质(限制强度 18.7%)。尽管华北平原区整体土壤肥力较高,但由于长期实行冬小麦-夏玉米一年两熟的高强度种植制度,作物对钾素的需求量大,而钾肥施用量相对不足。监测数据显示,该区域钾肥(以 K₂O 计)平均施用量为 65kg/hm²,仅为作物携出量的 70%左右,导致土壤速效钾含量年均下降 1.2mg/kg。速效钾缺乏会影响小麦的光合产物运输和抗逆性,使小麦茎秆强度降低,倒伏风险增加 30%以上,同时灌浆速率下降,千粒重降低 5%–8%。有机质限制则是因为该区域秸秆还田质量不高,部分农户为省时省力,秸秆粉碎不彻底且翻埋深度不足,导致土壤有机质年增速仅为 0.

15g/kg,低于东北黑钙土区的 0.25g/kg。有机质不足会使土壤保水保肥能力下降,在小麦拔节期遇干旱时,植株生长量比有机质适宜区域减少 15%–20%。

东北黑钙土区的主要限制因子为碱解氮(限制强度 19.2%)。该区域土壤有机质含量丰富,平均达 22.3g/kg,氮素总储量较高,但由于冬季寒冷漫长,土壤冻结期长,氮素矿化释放缓慢,且春小麦生长周期短,对氮素的需求集中在苗期至拔节期,易出现氮素供应滞后现象。同时,该区域部分农户存在“氮肥施用越多越好”的误区,盲目增加施氮量,导致氮素利用率仅为 30%左右,低于华北平原区的 38%。不合理的施氮方式使得土壤碱解氮含量在小麦生长前期偏低(平均 65mg/kg),影响幼苗生长,导致基本苗数不足;而后期氮素过剩,又易引发小麦贪青晚熟,千粒重降低 6%–10%,同时增加病虫害发生风险。

3 讨论

3.1 养分变化驱动机制

在自然因素中,年降水量与土壤有机质含量呈显著负相关($r=-0.68$)——黄土高原区因水土流失,每年的有机质流失量达到 1.2t/hm²。在人为因素里,当秸秆还田量达到 3t/hm² 以上时,可使土壤有机质年增速提高 0.15g/kg;而过量施氮(>240kg/hm²)会导致氮素淋溶损失率升至 35%以上。

3.2 产量响应机理

土壤有机质通过改善土壤团粒结构(>0.25mm 团聚体含量增加 20%)来提升土壤保水能力,从而增强小麦的抗旱性;氮素能够提高小麦叶绿素含量(SPAD 值增加 15),延长光合时间;磷素可促进小麦根系发育(根干重增加 30%);钾素能增强小麦茎秆韧性(倒伏率降低 40%)。当养分比例失衡(N:P₂O₅:K₂O>1:0.3:0.3)时,

会引发小麦贪青晚熟。

3.3 优化管理策略

针对不同区域的特点,提出分级调控方案:

华北平原:控制磷肥用量、稳定氮肥用量、补充钾肥(N:P₂O₅:K₂O=1:0.5:0.7),同时配合20%的有机肥替代

黄土高原:增加磷肥用量、补充氮肥(磷肥用量提高50%),推广等高种植以减少养分流失

东北黑土区:减少氮肥用量、增加碳投入(施氮量降低15%,增施秸秆3t/hm²)

4 结论

北方小麦种植区土壤养分呈现“东高西低、表聚明显”的空间特征和“磷升钾稳、有机质缓增”的时间趋势。土壤养分对小麦产量的影响存在阈值效应,当有机质含量在15-20g/kg、碱解氮含量在80-120mg/kg、有效磷含量在15-25mg/kg、速效钾含量在120-150mg/kg时,可实现6500kg/hm²以上的高产目标。

在不同施肥模式中,氮磷钾配施有机肥(NPKM)的

效果最佳,较常规施肥增产10.2%,且能将土壤有机质年增速提升至0.32g/kg。建议根据区域养分限制因子实施精准调控,华北平原重点补充钾肥,黄土高原强化磷肥投入,东北区注重有机质提升。

后续研究应聚焦土壤微生物对养分转化的调控机制,建立基于物联网的实时养分监测系统,为北方小麦产业的绿色高质量发展提供技术支撑。

参考文献

- [1]张春,杨万忠,韩清芳,等.夏闲期种植不同绿肥作物对土壤养分及冬小麦产量的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(2):8. DOI:10.7606/j.issn.1000-7601.2014.02.011.
- [2]张琳,张凤荣,孔祥斌,等.大城市郊区耕地种植结构变化规律及其对土壤养分的影响——以北京市大兴区为例[J].土壤通报,2008,39(6):1272-1276. DOI:10.3321/j.issn:0564-3945.2008.06.009.
- [3]马超,周静,郑学博,等.秸秆促腐还田对土壤养分和小麦产量的影响[J].土壤,2012(01):32-37. DOI:CNKI:SUN:TURA.0.2012-01-005.