

DOI: 10.3724/SP.J.1011.2011.01143

华北山前平原农田土壤肥力演变与养分管理对策*

张玉铭¹ 胡春胜¹ 毛任钊¹ 张佳宝² 董文旭¹ 李立峰³

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 中国科学院农业水资源重点实验室 河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022; 2. 封丘农田生态系统国家试验站 土壤与农业可持续发展国家重点实验室 中国科学院南京土壤研究所 南京 210008; 3. 河北宁晋中学 宁晋 051600)

摘 要 通过对 2000 年、2008 年栾城县农田土壤养分与 1979 年土壤普查资料的比较, 分析了养分肥力指标的变化程度, 研究了 30 年间该县农田土壤养分演变趋势及其原因, 提出了养分资源管理的相应对策。研究结果表明, 2008 年土壤肥力状况较 2000 年和 1979 年发生了明显变化, 土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量均有显著提高($P < 0.01$), 碱解氮含量增加尤为显著。土壤碱解氮平均含量由 1979 年的 $56.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 2000 年的 $80.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 2008 年的 $109.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 1979~2000 年间土壤碱解氮以每年 $1.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的平均速度增长, 年均增长率 1.9%, 增幅 41.1%; 进入 21 世纪后, 增长速度明显加快, 2000~2008 年间以每年 $3.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的平均速度增长, 年均增长率 4.5%, 增幅为 36.4%。土壤有机质由 1979 年的 $11.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 2008 年的 $18.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均每年以 $0.24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的速度增长, 年均增长率为 2.1%, 增幅为 62.1%。30 年间土壤有效磷含量由 $17.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $24.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增加幅度为 41.1%。由于受到“北方石灰性土壤不缺钾”的观点影响, 20 世纪该区域农民很少施用钾肥, 1979~2000 年间土壤速效钾含量呈下降趋势, 由 $140.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 $111.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 下降幅度 20.8%; 进入 21 世纪, 由于秸秆还田措施的実施和含钾肥料的施用, 至 2008 年全县土壤速效钾平均含量又回升到 $149.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。栾城县农田土壤肥力水平较高, 生产潜力大, 该区域农田养分管理应以氮素的精确管理为核心, 以实现作物持续高产稳产与环境保护相协调为目标, 氮肥管理推行实时诊断与推荐施肥技术, 磷钾肥实施恒量监控储备施用技术, 推广秸秆直接还田, 实行有机无机相结合的培肥措施。

关键词 河北省栾城县 土壤养分 肥力演变 养分管理 秸秆还田 施肥

中图分类号: S331 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2011)05-1143-08

Change in farmland soil fertility and nutrient management strategy in the piedmont of Mount Taihang, North China Plain

ZHANG Yu-Ming¹, HU Chun-Sheng¹, MAO Ren-Zhao¹, ZHANG Jia-Bao², DONG Wen-Xu¹, LI Li-Feng³

(1. Key Laboratory of Agricultural Water Resources of Chinese Academy of Sciences; Hebei Key Laboratory of Agricultural Water-Saving; Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. State Experimental Station of Agro-Ecosystem in Fengqiu; State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture; Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Ningjin Middle School of Hebei, Ningjin 051600, China)

Abstract The trend, degree and mechanism of change in soil nutrient/fertility in farmlands of Luancheng, Hebei Province was analyzed using soil survey data for 2008, 2000 and 1979, from which a sustainable strategy for agricultural nutrient resource management was put forward. The results indicated a significant change in soil fertility for 1979 through 2008. There was a significant increase ($P < 0.01$) in soil organic matter, Olsen-P, available K, and especially in available N. Average available N increased from $56.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in 1979 to $80.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in 2000, and to $109.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in 2008. This represented an annual increment of $1.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $3.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in 1979~2000 and 2000~2008, respectively. Available N increased by 1.9% and 4.5% annually for 1979~2000 and 2000~2008 and with a total corresponding increase of 41.1% and 36.4%, respectively. The rate of increase in 2000~2008 was higher than in 1979~2000. Soil organic matter content increased from $11.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in 1979 to $18.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in 2008, which represented an an-

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q1-07)和国家自然科学基金面上项目(30970534)资助

张玉铭(1964~), 女, 副研究员, 主要研究方向为农田生态系统养分循环与平衡及其环境效应。E-mail: ymzhang@sjziam.ac.cn

收稿日期: 2011-05-26 接受日期: 2011-07-20

nual increment of $0.24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Soil organic matter increased by 2.1% annually and by 62.1% in total for 1979~2008. Soil Olsen-P content increased from $17.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $24.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the 30-year period, represented a total increase of 41.1%. It was then evident that no shortage existed in soil potassium due to the calcareous nature of soils in North China coupled with occasional potassium fertilizer application in the past century. This resulted in a decrease in available K from $140.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $111.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in 1979~2000, representing 20.8% decrease over the period. Available K increased to $149.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in 2008 as a result of incorporating straw into the soil and increasing potassium fertilizer application in the current century. Soil fertility in the farmlands of Luancheng was high with a high potential for agricultural production. While the key to nutrient management in the region lied with nitrogen, the overall objective of nutrient management was sustainable high crop yield and sound environment. While nitrogen management should include real-time soil nutrient deficiency diagnosis and dosage, phosphorus and potassium management should based on constant soil nutrient monitoring and conservative phosphorus/potassium application. Fertilizer management practices that incorporate straw into the soil and combine the application of organic and inorganic fertilizers should be implemented in the study area.

Key words Luancheng County of Hebei Province, Soil nutrient, Change in fertility, Nutrient management, Incorporating straw into soil, Fertilization

(Received May 26, 2011; accepted Jul. 20, 2011)

华北太行山前平原自然条件优越, 农田生态系统生产力高, 属农业高产类型区, 其耕作制度以冬小麦-夏玉米两熟为主。随着化肥投入水平的增加, 粮食单产处于缓慢增长的状态。土壤肥力状况是农田生态系统生产力的重要制约因素之一, 充分了解土壤肥力分布特征是合理调控土壤肥力和实施精准施肥的基础^[1]。土壤肥力因素包括水、肥、气、热四大因素, 其中土壤养分是土壤肥力的主要特征之一^[2], 也是较易控制的肥力因素之一, 是一个动态指标, 随着农业管理水平的改变而发生变化。跟踪了解土壤养分肥力的变化趋势与变化程度, 分析其变化的原因, 可为土壤质量管理及肥料的精确施用提供决策依据, 对栽培作物获得持续高产稳产有重要的理论和实际意义。

自 1979 年第 2 次土壤普查至今, 农户的耕作栽培及施肥水平发生了很大变化, 但对土壤养分长期以来的变化缺乏全面的分析和了解, 施肥还存在着盲目性, 特别是近年来该区域过量施肥现象严重。鉴于此, 以河北省栾城县为例分析自第 2 次土壤普查以来 30 年间农田土壤养分肥力动态及其影响因子, 以期合理施肥与土壤养分肥力调控提供依据, 为华北平原高产农区耕地质量持续提升、农业持续发展和系统生产力提高提供服务。

1 材料与方法

1.1 研究区域基本情况

栾城县位于华北太行山前平原, 属暖温带半湿润半干旱季风气候, 海拔高度 50.1 m, 年平均气温 12.2°C , 冬季寒冷干燥, 夏季炎热多雨, 平均年降水量 500~600 mm, 年蒸发量为 1 040 mm 左右, 0°C 积温 $4\ 713^\circ\text{C}$, 无霜期 200 d 左右。栾城县现有耕地面积 $31\ 453 \text{ hm}^2$, 土壤主要为壤质潮褐土, 耕作制度以小麦-玉米一年两熟为主。

1.2 土壤样品采集

采用 1978 年第 2 次土壤普查资料。2000 年和 2008 年分别在冬小麦播种前, 以 1978 年第 2 次土壤普查采样点位为基础, 采用 GPS 定位技术, 在栾城县以 1 km 为步长网格式布点进行定点取样, 采样深度 0~20 cm, 共采集土样 289 个, 样点布局如图 1 所示。



图 1 河北省栾城全县土壤采样点分布示意图
Fig. 1 Sketch map of soil sampling points in Luancheng County, Hebei Province

1.3 土壤养分测定方法

土壤有机质测定采用重铬酸钾容量法, 碱解氮测定采用碱解扩散法, 速效磷(Olsen-P)测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法, 速效钾测定采用醋酸铵浸提原子吸收法。

1.4 数据处理

采用 SPSS 软件进行土壤养分数据统计描述。

2 结果与分析

2.1 土壤养分的总体变化情况

土壤不仅是作物生长的介质, 也是作物养分的

基本来源。在大田生产中,即使在施肥的条件下,通常作物吸收的养分中也大部分来自土壤。土壤养分状况是土壤肥力高低的重要标志。土壤养分的总水平一般用全量和有效量来评价,其中某种养分的全量表示供应该种养分潜力的大小,而有效养分水平是土壤对作物养分的供应能力。当土壤缺乏一种或一种以上营养元素时,作物将达不到应有的产量水平。但缺乏一种元素的同时,增施另一种营养元素并不能使产量增加。所以施肥前必须确知土壤是否缺乏某种营养元素及其缺乏的程度,以便决定是否需要施肥和施肥量。土壤有效养分分级指标是诊断土壤肥力和实施农田养分精准管理的基础,一般根据土壤养分测试结果与作物相对产量(以养分充分供应时产量为 100%)将土壤有效养分丰缺程度划分为“极高、高、中、低、极低”5 级,分别对应于相对产量为 >95%、85%~95%、70%~85%、50%~70%和 <50%时的土壤有效养分含量。表 1 列出了华北太行山前平原土壤养分分级指标与临界指标。

全面了解和掌握农田养分状况及其变化趋势,可为提出合理配置和使用氮磷钾肥料提供基础信息。表 2 给出了自 1979 年以来 30 年间栾城县农田土壤养分的总体变化情况。结果表明,自 1979 年第 2 次土壤普查至 2008 年 30 年间栾城县农田土壤有机质、碱解氮和有效磷含量呈不断上升趋势,且年度间各养分含量存在极显著差异($P<0.01$),这与生产力水平不断提高、化肥投入量不断增加和 20 世纪 90 年代后期开始实施的秸秆还田措施密切相关。自

1979 年至 2000 年土壤速效钾含量呈下降趋势,2000 年速效钾含量极显著低于 1979 年($P<0.01$),进入 21 世纪,土壤速效钾含量有所回升,2008 年土壤速效钾含量极显著高于 2000 年($P<0.01$)。全县农田土壤除有机质含量处于较低水平(4 级)外,其他各养分含量属于中等偏上水平(2~3 级)。

2.2 不同土壤养分的具体变化情况

2.2.1 土壤有机质

土壤有机质是表征土壤质量和肥力的重要指标。自 1979 年以来栾城县农田土壤有机质含量极显著提高,1979 年全县土壤有机质平均含量 $11.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,至 2008 年增加到 $18.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均每年以 $0.24 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的速度增长,年均增长率(年度变化量除以起始年度养分含量的百分比,下同)为 2.07%,增幅为 62.1%。全县各乡镇农田土壤有机质含量略有差异,总体趋势是以靠近石家庄市区的西北部各乡镇偏高,远离市区的东南部各乡镇偏低,特别是在 1979 年这种趋势更为明显(图 2a)。这主要与农业生产力水平有关,30 年间以西北部的南高乡、窦姬镇和楼底镇农田土壤有机质增长最为明显。但从反映离散程度的变异系数来看,变异系数在 25%以下,属中度偏弱变异程度,表明全县土壤有机质分布相对较均匀。

尽管在过去的 30 年间土壤有机质得到了极显著提高,但按照全国第 2 次土壤普查土壤养分分级标准,栾城县农田土壤有机质平均含量处于偏低水平(4 级)。1979 年全县 73.8%的耕地面积土壤有机质含量为 4 级,26.2%的面积为 5 级,以南高乡 5 级所占面

表 1 土壤养分含量分级标准
Table 1 Classification standard of soil nutrient contents

项目 Item	临界值 Critical value ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	等级 Rank ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)				
		极低(5 级) Very low (5 th rank)	低(4 级) Low (4 th rank)	中(3 级) Middle (3 rd rank)	高(2 级) High (2 nd rank)	极高(1 级) Very high (1 st rank)
碱解氮 Available N	70	<30	30~70	70~90	90~120	>120
速效钾 Available K	90		<90	90~120	120~150	>150
速效磷 Available P	14	<7	7~14	14~30	30~40	>40
有机质 Organic matter		< 10	10~20	20~30	30~40	> 40

表 2 30 年来栾城县农田土壤养分总体变化
Table 2 General changes of soil nutrients in farmland soil of Luancheng County during 30 years

年份 Year	有机质 Organic matter			碱解氮 Available N				有效磷 Available P				速效钾 Available K			
	含量 Content ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	级别 Rank	C.V (%)	含量 Content ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	级别 Rank	C.V (%)	PBC (%)	含量 Content ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	级别 Rank	C.V (%)	PBC (%)	含量 Content ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	级别 Rank	C.V (%)	PBC (%)
1979	11.6C	4	25.3	56.7C	4	23.2	86.0	17.5C	3	51.7	39.3	140.6 B	2	19.6	0.8
2000	17.2B	4	13.1	80.0B	3	12.4	15.1	21.0B	3	65.6	36.9	111.4 C	3	26.3	20.0
2008	18.8A	4	16.5	109.1A	2	17.9	3.1	24.7A	3	71.7	33.3	149.5A	2	37.1	2.7

PBC: 低于临界值土样数占总土样数比例 Percentage of the samples, whose value are below critical value, to the total sample; C.V: 变异系数 Coefficient of variation; 同列数字后不同大写字母表示不同年度间养分含量差异达 1%显著水平 Different capital letters mean significant difference among years at 1% level.

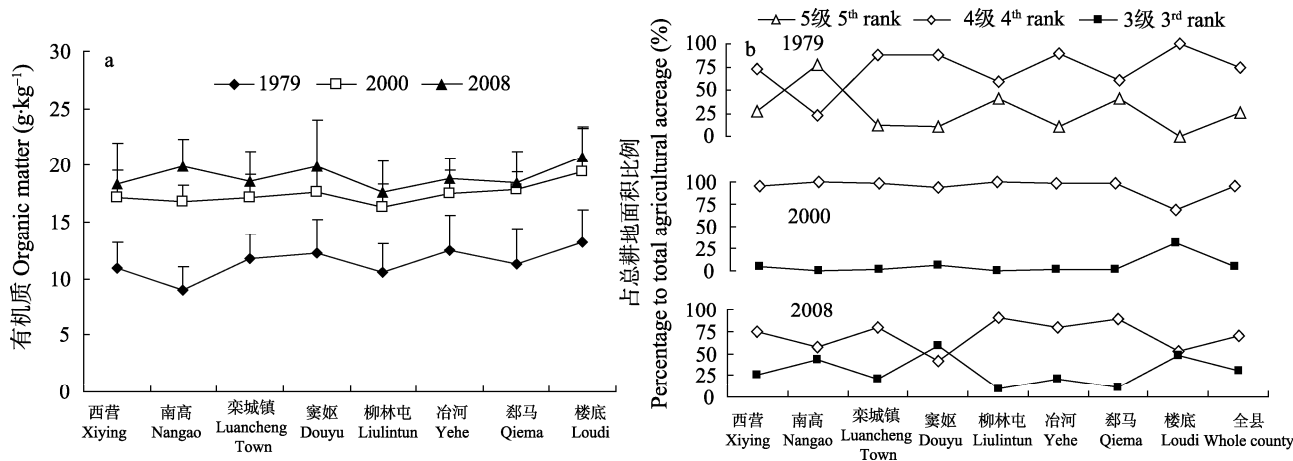


图 2 栾城县各乡镇 1979 年、2000 年和 2008 年农田土壤有机质变化趋势

Fig. 2 Changes of soil organic matter in every town of Luancheng County in 1979, 2000 and 2008

积最大, 其 5 级耕地面积占其总面积的 77.7%, 其他各乡镇以 4 级为主(图 2b)。随着社会经济的发展和农业生产水平水平的提高, 特别是 20 世纪 90 年代后期实施秸秆还田, 大量作物根茬、秸秆归还土壤, 使得土壤有机质含量得到普遍提升。至 2000 年, 各乡镇耕地土壤有机质不再存在 5 级土壤, 全县 4 级耕地面积占全部耕地面积的 95.3%, 其他为 3 级土壤; 以楼底镇 3 级耕地面积所占比例最大, 为 31.8%。至 2008 年全县土壤有机质含量处于 3 级的耕地面积占总耕地面积的 29.5%; 以窦姬镇 3 级土壤所占比例最大, 为 58.5%; 其次为楼底镇和南高乡, 分别为 48.0%和 42.4%; 其他各乡镇在 20%左右或更低。

土壤有机质含量的持续提升是多年来肥料投入量加大和实施秸秆还田措施的结果。土壤有机质含量取决于分解量和形成量的相对大小, 农田土壤有机质含量, 一方面受到气候条件、成土母质等自然条件的制约, 另一方面, 更受耕作、施肥以及灌溉等人为活动的影响。首先, 华北地区土壤母质有机质含量较贫乏, 质地较轻粗, 呈石灰性土壤, 加之该地区气候条件的影响, 土壤有机质矿化速率较高, 不利于土壤有机质的积累^[3], 这也是尽管多年实施秸秆还田措施, 本区域土壤有机质含量持续维持在较低水平(4 级)的主要原因。如果该地区土壤有机质含量升高, 需要投入大量的有机碳来维持土壤碳库平衡^[4], 否则容易造成土壤有机质下降。其次, 总化肥用量或无机氮肥用量显著影响土壤有机质含量^[5], 提高化肥用量可迅速提升土壤速效养分含量, 较快满足作物生长发育对养分的需求, 不仅提高了作物产量, 亦提高了归还土壤的根量, 从而提高土壤有机质含量^[4]。

2.2.2 土壤碱解氮

土壤碱解氮是衡量近期土壤供氮能力的重要标志。全县农田土壤碱解氮平均含量由 1979 年的

56.7 mg·kg⁻¹ 增加到 2000 年的 80.0 mg·kg⁻¹ 和 2008 年的 109.1 mg·kg⁻¹, 各年度之间差异均达极显著水平($P<0.01$)(表 2)。1979~2000 年间土壤碱解氮以每年 1.1 mg·kg⁻¹ 的平均速度增长, 年均增长率 1.9%, 增幅 41.1%。进入 21 世纪后, 增长速度明显加快, 2000~2008 年间以每年 3.6 mg·kg⁻¹ 的平均速度增长, 年均增长率 4.5%, 增幅为 36.4%。随着土壤碱解氮含量的不断提升, 全县土壤碱解氮平均含量级别由 1979 年的 4 级逐步上升到 2000 年的 3 级和 2008 年的 2 级; 低于临界值的土壤样点数逐渐减少, 1979 年全县有 86.0%的样点土壤碱解氮含量低于临界值, 到 2008 年已降至 3.1%, 即有 96.9%的样点土壤碱解氮含量超过了临界指标, 施用氮肥的增产效果不显著。

施入土壤中的氮, 因其移动性相对较大, 加之本区域氮肥施用方法一般采用撒施后漫灌, 致使土壤中氮分布相对较均匀, 其变异系数低于 25%, 变异程度属中等偏弱。图 3 显示了 30 年间各乡镇土壤碱解氮的变化情况, 以南高乡土壤碱解氮增长幅度最大, 栾城镇增幅最小, 其他各乡镇增长幅度相当(图 3a)。1979 年除栾城镇外, 其他各乡镇土壤碱解氮以 4 级为主, 3 级和 2 级耕地面积占总耕地面积的百分比均在 10%以内, 栾城镇 3 级、4 级所占比例分别为 39.4%和 58.6%。2000 年全县有 91.7%的耕地面积土壤碱解氮含量为 3 级, 其他少数为 4 级和 2 级。至 2008 年, 全县土壤碱解氮含量得到进一步提升, 土壤碱解氮含量级别以 2 级和 1 级为主, 分别占耕地总面积的 74.4%和 21.6%, 其他不到 5%的耕地面积为 3 级和 4 级(图 3b)。

土壤氮素的持续大幅度提升是氮肥长期过量施用的结果, 虽为作物高产稳产提供了充足的物质基础, 但同时也提高了氮素环境污染风险。合理调控

农田氮素养分, 实现经济效益、环境效应双赢是当前本区域农业生产面临的重大挑战。

2.2.3 土壤有效磷

土壤有效磷是表征土壤供磷能力的重要指标, 包含了土壤供磷强度因子和容量因子^[6]。农业中含磷肥料的应用在很大程度上改变了农田土壤含磷量和土壤对作物的供磷能力, 全面了解农田土壤磷素状况, 对于制定切实可行的磷素管理对策, 促进农业的可持续发展具有重要意义。

在过去的 30 年间栾城县农田土壤有效磷得到了极显著提升, 全县平均有效磷含量由 1979 年的 $17.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 提升到 2000 年的 $21.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 2008 年的 $24.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 2)。1979~2000 年间土壤速效磷以每年 $0.16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的平均速度缓慢增长, 年均增长率 0.9%, 增幅 20.0%。2000~2008 年间增长速度明显加快, 以每年 $0.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的平均速度增长, 年均增长率 2.2%, 增幅为 17.6%。随着土壤速效磷含量的不断提升, 低于临界值的土壤样点数逐渐减

少, 1979 年全县有 39.3% 的样点土壤速效磷含量低于临界值, 到 2008 年已降至 33.3%。从全县农田土壤有效磷总体发展水平来看, 自 1979 年以来, 其含量级别始终处于 3 级, 属中等含量水平。

施入土壤中的磷易于被土壤所固持, 在土壤中移动性较小, 分布不均, 从表征离散程度的变异系数可知, 栾城县农田土壤有效磷空间分布属强度变异, 变异系数在 51.7%~71.7% 之间(表 2)。图 4 表明 1979~2008 年间栾城县各乡镇土壤有效磷变化存在明显差异, 郝马镇、栾城镇、窦姬镇土壤有效磷含量增长缓慢, 以年均 $0.05\sim 0.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的速度增长, 年均增长率为 0.2%~1.0%; 冶河镇、柳林屯乡和南高乡增长速度较快, 平均每年增长 $0.37\sim 0.62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 年均增长率为 2.0%~4.0%; 楼底镇是栾城县距离石家庄市最近的乡镇, 农村经济发展较早, 1979 年时其土壤有效磷含量在全县最高($21.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 随着城镇化步伐的加快, 农民对农业生产的重视程度逐渐减弱, 农业投入相对其他乡镇增长

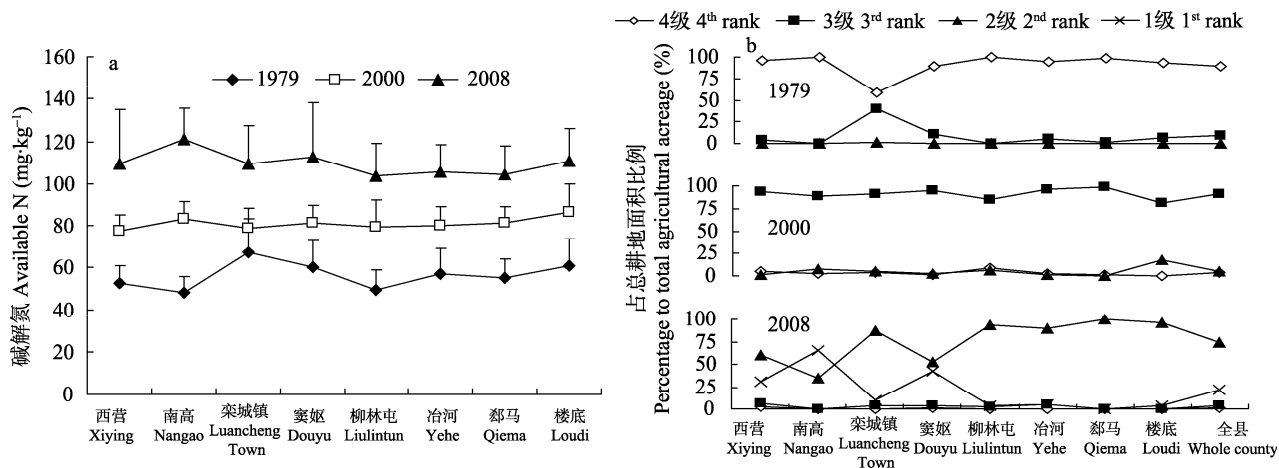


图 3 栾城县各乡镇 1979 年、2000 年和 2008 年农田土壤碱解氮变化趋势

Fig. 3 Changes of soil available N in every town of Luancheng County in 1979, 2000 and 2008

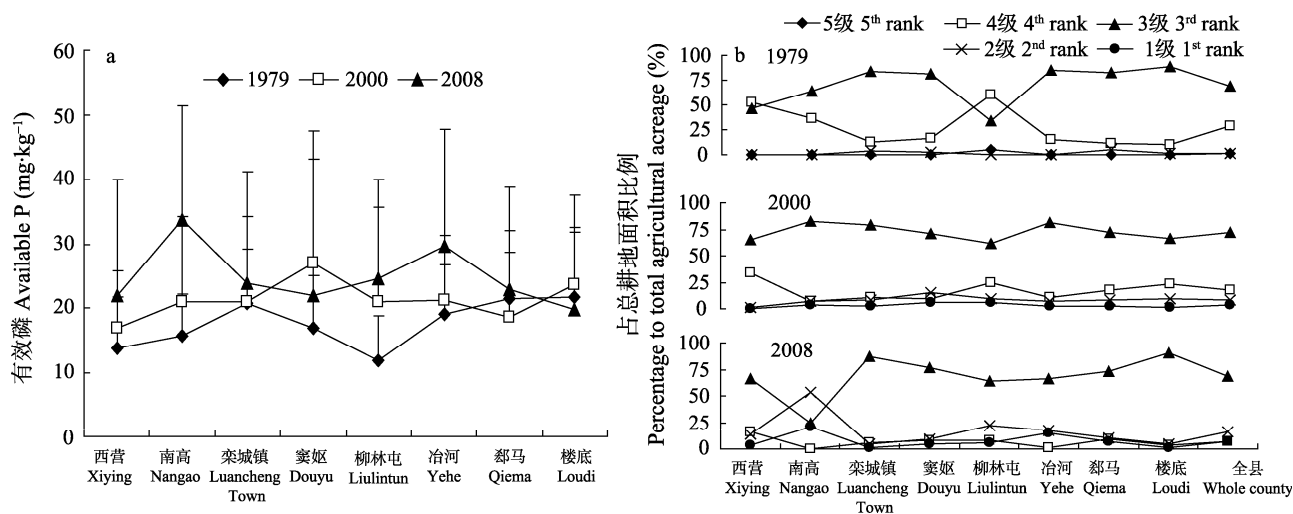


图 4 栾城县各乡镇 1979 年、2000 年和 2008 年农田土壤有效磷变化趋势

Fig. 4 Changes of soil available P in every town of Luancheng County in 1979, 2000 and 2008

缓慢,养分投入比例失衡,农田磷素携出大于输入,导致 1979~2008 年间土壤速效磷含量略有降低,降低幅度为 9%(图 4a)。从各乡镇土壤有效磷含量级别变化情况看(图 4b),多数乡镇土壤有效磷含量为 3 级的耕地面积占主导地位,占总耕地面积的比例变化不明显,全县土壤有效磷平均含量的增加主要是 4~5 级面积的减少和 1~2 级面积的增加所致。

土壤有效磷含量水平受含磷肥料包括无机磷肥和有机磷肥投入量的影响。据栾城县国民经济统计资料显示,1986 年栾城全县农田磷素投入量为 3 324 t,2006 年增加至 4 647 t,20 年间磷肥用量增加 39.8%,是土壤有效磷含量水平提高的重要原因之一;有机肥(包括秸秆还田)施用是提高土壤有效磷含量的另一重要途径,其原因除有机肥自身矿化释放无机磷外,更重要的是由于有机肥在分解过程中产生有机酸,利于土壤无机磷的释放^[7]。

2.2.4 土壤速效钾

长期以来,土壤速效钾被广泛用于土壤供钾能力的预测^[8]。由表 2 可以看出,1979 年至 2000 年间土壤速效钾含量呈下降趋势,由 $140.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降到 $111.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均每年以 $1.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的速度下降,下降幅度 20.8%,主要原因是第 2 次土壤普查结果显示土壤速效钾含量较高,且一直受“北方石灰性土壤不缺钾”的观点影响,农业生产中忽视了土壤钾素管理,20 世纪 90 年代中期前栾城县农田钾素收支为赤字^[9],导致土壤速效钾含量的下降。进入 21 世纪后,随着秸秆还田措施的普及,以及多元复混肥料的施用,土壤速效钾含量逐渐回升,与 2000 年相比,2008 年土壤速效钾含量增长幅度为 34.2%,平均每年以 $4.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的速度增长,年均增长率 4.3%;与 1979 年相比,全县土壤速效钾含量平均增加 6.3%。从各乡镇土壤速效钾含量变化情况来看,以

楼底镇、窦姬镇速效钾含量增加最为显著(图 5a)。

由于受到成土母质的影响,栾城县土壤速效钾含量处于中等偏上水平。1979 年全县有 65.4% 的耕地面积土壤速效钾含量属于 2 级,1 级含量面积为 24.2%,各乡镇间不同级别土壤所占总耕地面积比例差异不显著;至 2000 年,随着土壤速效钾含量整体水平的下降,全县土壤速效钾含量级别以 3 级为主,占总耕地面积的 62.0%,2 级仅为 21.1%;2008 年全县土壤速效钾含量不同级别所占总耕地面积的比例依次为 1 级 38.9%,2 级 43.6%,3 级 17.3%;各乡镇农田土壤速效钾含量不同级别所占总耕地面积的比例存在明显差异,楼底镇和窦姬镇农田土壤速效钾含量以 1 级为主,所占总耕地面积的比例分别为 62.9%和 63.3%(图 5b),速效钾含量属于极高水平。

土壤速效钾含量的变化深受含钾肥料施用的影响。据栾城县国民经济统计资料显示,1985 年前栾城县无钾肥施用的记载,1986 年开始施用钾肥,全县施用量仅为 46 t,至 2000 年增加至 359 t,到 2006 年已增加到 1 579 t,含钾肥料用量的增加是进入 21 世纪后土壤速效钾含量增加的重要原因之一。此外,作物秸秆还田亦是保持和提高土壤速钾素含量的重要措施,一般作物收获时 70%~80% 的钾集中在茎、叶中,随着秸秆还田而返还到土壤中,减少了农田钾素的支出,利于土壤钾素保持与提高。

2.3 农田养分管理对策

2.3.1 合理施用化肥,氮肥管理推行实时诊断与推荐施肥技术,磷、钾肥实施恒量监控储备施用技术

栾城县农田土壤肥力水平较高,生产潜力大,但从目前养分供应状况来看,已经出现不平衡状况,土壤氮素含量水平偏高,磷素属中等水平,钾素丰富。针对目前栾城县化肥施用重氮轻钾状况,适度

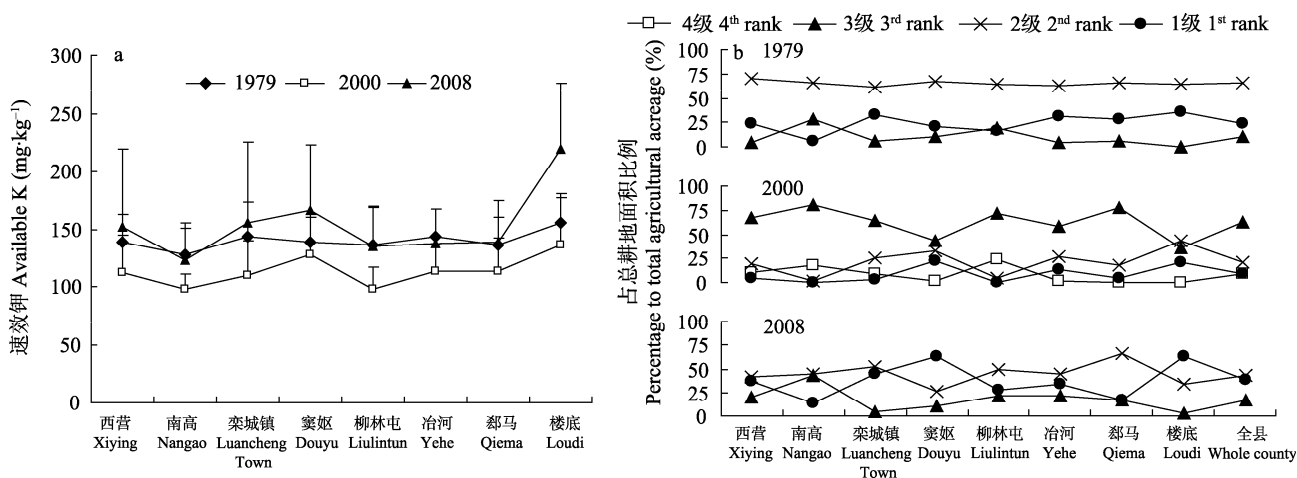


图 5 栾城县各乡镇 1979 年、2000 年和 2008 年农田土壤速效钾变化趋势

Fig. 5 Changes of soil available K in every town of Luancheng County in 1979, 2000 and 2008

控氮增磷补钾, 根据土壤供肥能力与作物高产需求, 确定适宜的施肥水平。

由于氮素资源具有来源的多源性、转化的复杂性、去向的多向性及其环境的危害性、作物产量和品质对氮素反应的敏感性特征, 农田氮素是养分资源管理的核心^[10]。在传统水肥管理模式(大水大肥)下, 造成大量硝态氮随水迁移出作物主要根系层^[11], 提高了氮素环境风险。实现作物持续高产与环境保护相协调的有效措施就是尽可能使来自土壤、肥料和环境的养分供应与高产作物养分需求在时间上同步、在空间上耦合, 将作物主要根系层养分调控在既能满足作物高产的养分需求, 又不至于造成养分过量累积而向环境中迁移的范围内。因此, 农业生产实践中应推行氮素实时实地精确监控, 方可实现氮肥的合理推荐与精确管理, 提高氮肥利用效率, 降低氮素环境风险。建议该区域小麦-玉米轮作体系中, 小麦底肥采用根层养分调控技术^[10]进行推荐施肥, 小麦追肥和玉米追肥采用基于作物冠层数字图像技术的氮素快速诊断^[12-13]或植株硝酸盐快速测定的氮素营养诊断^[10]与推荐施肥技术。

土壤磷钾移动性较小, 易于在土壤中累积, 不断为作物吸收利用, 表现出长期的叠加效应。在农田磷钾养分管理中, 以保障耕地地力持续提升、作物持续稳产高产, 又不造成环境风险或资源浪费为目标。因为土壤磷、钾不像氮素那样易于随水淋失或气态损失, 在推荐施肥中不需要每季或每年进行土壤磷、钾肥力的监测, 可根据长期定位试验结果, 将3~5年作为1个周期进行监测, 根据监测结果, 采取“提高”、“维持”或“控制”的方法调控管理策略及相应施肥推荐^[10,14-15]。通常认为, 北方地下水位较低的平原地区农田土壤磷素的环境风险较低, 只有当土壤速效磷含量超过磷素淋溶临界点时, 才可能会引起磷素淋洗进入地下水层^[16-18]。以当前栾城县土壤有效磷含量水平, 距土壤磷素淋溶临界点差距较大, 目前还不存在磷素的环境风险, 可采用储备性施磷技术^[6], 将3~5年用量集中1次施用, 每隔3~5年施用1次, 充分发挥磷肥后效特点, 尽可能减少农事活动带来的人力、物力投入。

在肥料结构上, 要改变化肥品种单一的状况, 重视多元复合肥及微肥施用, 促进土壤养分均衡、协调发展。在施肥方法上, 要根据作物、土壤条件合理施用, 改变目前氮肥表施的施肥方法, 推行深施、覆土, 以减少养分损失。此外应推广测土施肥或配方施肥技术, 努力实现农田施肥精准管理, 变盲目施肥为科学施肥, 提高化肥利用效率。建议施肥时应保持养分的基本平衡, 防止土壤肥力下降。

2.3.2 推广秸秆直接还田, 实行有机无机相结合的培肥措施

栾城县耕地面积3万多公顷, 粮食总产 2.76×10^8 kg, 平均每年每公顷可生产19 075 kg 秸秆, 各类秸秆年产 5.82×10^8 kg, 秸秆资源丰富。在农村经济发展、劳动力转移和价值观念改变的今天, 大力推广秸秆直接还田技术, 充分利用当地秸秆资源, 补充、更新和提高土壤有机质, 实现生物氮、磷、钾肥源的循环再利用, 实现有机无机肥料的配合施用, 较好地协调经济效益、社会效益和生态环境三者关系。根据本区耕种习惯, 夏收时, 小麦秸秆实施表层覆盖, 起到保墒节水作用; 秋收时, 玉米秸秆粉碎还田旋耕或少免耕, 每3~4年进行1次深翻耕。在实施秸秆直接还田技术时要注意做好土壤管理和合理施肥, 土壤墒情低时要浇足底墒水, 以确保种子发芽出苗, 为秸秆腐解营造适宜的土壤环境; 在原配方施肥基础上要适当增加氮肥, 以调节碳氮比, 使之达到土壤微生物活动及繁殖适宜范围25:1左右, 以免出现微生物与作物争氮现象。

2.3.3 基于土壤养分含量分级的精准施肥技术

根据土壤测试结果划分养分级别, 以养分的级别及作物对养分的需求提出各种养分的施用量, 是精准推荐施肥的主要方法之一。其计算公式为:

$$F=y \times (1-R_y) \times N/E \quad (1)$$

式中, F 为施肥量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), y 为目标产量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$), R_y 为与养分水平相应的相对产量(%), N 为每生产1 t 经济产量的养分消耗量(kg), E 为肥料利用率(%)。

土壤养分存在空间变异性。传统的施肥方法尤其是一家一户的农田管理模式, 加大了土壤养分的空间变异程度, 为了平衡土壤肥力, 提高肥料利用率, 降低生产成本及过量施肥对环境带来的危害, 根据试验测试结果, 利用公式(1), 针对不同养分水平分级等级, 提出了适宜于本区的推荐施肥方案(表3)。

该方法的优点是在确定不同土壤养分等级施肥量后, 在一定时间和一定地区内, 只要测得土壤速效养分含量, 即可提出肥料用量建议, 缺点是需要繁重的田间采样和室内分析化验工作, 不能及时提出施肥决策方案。

3 结论与讨论

栾城县2008年土壤肥力状况较1979年发生了明显变化, 土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量均有显著增加, 碱解氮含量增加尤为显著, 各养分增加幅度由大到小的顺序依次为碱解氮>有机质>有效磷>速效钾。氮肥用量的迅速增加是农田土壤碱解氮含量提升的主要原因。据统计资料显示, 全县氮肥(纯氮)用量由1986年的6 145 t 增加到2006年

表 3 基于土壤养分等级的栾城县推荐施肥量

Table 3 Recommended fertilization rates basic on soil nutrient content level in Luancheng County

目标产量 Target yield (t·hm ⁻²)	养分 Nutrient	耕层土壤速效养分 Soil nutrient content (mg·kg ⁻¹)	推荐施肥量 Recommended fertilization rate (kg·hm ⁻²)	
			小麦 Wheat	玉米 Maize
6~7.5	碱解氮 Available N	30~70	158~197	213~266
		70~120	89~111	120~149
	有效磷 Available P	7~14	78~98	
		14~30	44~55	
		30~40	20~25	
	速效钾 Available K	90~150	68~84	61~77

的 9 418 t, 增长幅度为 53.6%。长期以来本区域农民有偏重施用氮肥的习惯, 过量施氮现象严重, 据调查, 近年来栾城县小麦-玉米轮作系统氮肥年平均用量已超过 500 kg(N)·hm⁻², 个别田块已高达 700 kg(N)·hm⁻², 远远超过了作物对氮素的需求, 大量肥料氮残留于土壤中, 增加了土壤氮素含量, 提升了氮素的环境污染风险。目前, 该区域农田养分管理的核心是氮素的精确管理, 以实现作物持续高产稳产与环境保护相协调为目标, 以农田氮素实时实地精确监控为手段, 推行精准变量施肥技术, 最大限度地发挥氮肥的增产效果, 提高氮素利用效率, 降低环境风险, 实现经济效益和环境效应双赢。

土壤速效养分含量级别是推荐施肥的重要依据。在过去 30 年间土壤碱解氮由 4 级跃升到 2 级; 有效磷仍维持在 3 级; 速效钾经历了一个时期的下降后, 由于秸秆还田措施的实施和含钾肥料的施用, 至 2008 年又回升到了 2 级。根据土壤养分指标的变化情况, 对推荐施肥方案进行相应调整, 提出氮、磷、钾肥的适宜用量, 可有效解决过量施肥和施肥比例不合理问题。同时, 可避免因传统施肥方法尤其是一家一户的农田管理模式造成的土壤养分空间变异程度的扩大, 从而达到平衡土壤肥力, 提高肥料利用率, 降低生产成本及过量施肥对环境带来的危害。此外, 在农田养分管理中, 应根据不同养分资源特性进行区别对待, 对于氮素, 应进行实时监控、精量施用; 对于磷、钾, 可实行恒量监控、储备施用。

土壤有机质含量水平是土壤肥力高低的一个重要指标, 有机质含量高, 土壤理化性状好, 保墒保肥能力强。由于受到成土母质和气候条件的限制, 尽管在过去的 30 年间栾城县土壤有机质有了显著性提高, 但其含量水平仍处于较低水平(4 级)。提高土壤有机质含量要经历一个长期过程, 对耕作土壤来说, 培肥的中心环节就是增施各类有机肥。栾城县秸秆资源丰富, 秸秆还田措施已为广大农民所接受, 是土壤有机质含量增加的主要原因。长期实施秸秆还田能有效改良土壤, 培肥地力, 提高土壤有机质和氮、磷、钾等养分含量, 是实现耕地质量持续提升的重要途径之一^[19]。秸秆还田可以有效保持

农田生态系统内部物质、能量良性循环, 维持作物持续高产稳产, 减少作物对外部物质、能量的依赖, 形成一个稳定的、自循环程度较高的生产系统, 有利于农业的可持续发展^[20]。

参考文献

- [1] 黄绍文, 金继运, 杨俐苹, 等. 县级区域粮田土壤养分的空间变异性[J]. 土壤通报, 2002, 33(3): 188-193
- [2] 赵凡, 沈玉梅, 何秀云, 等. 耕地土壤肥力因子演变的变化程度分析[J]. 河南农业科学, 2010, 12: 55-58
- [3] 林心雄. 中国土壤有机质状况及其管理[M]//沈善敏. 中国土壤肥力. 北京: 中国农业出版社, 1998: 111-159
- [4] 李忠佩, 林心雄, 车玉萍. 中国东部主要农田土壤有机碳库的平衡与趋势分析[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 351-360
- [5] 张金涛, 卢昌艾, 王金洲, 等. 潮土区农田土壤肥力的变化趋势[J]. 中国土壤与肥料, 2010(5): 6-10
- [6] 沈善敏. 中国土壤磷素肥力与农业中的磷管理[M]//沈善敏. 中国土壤肥力. 北京: 中国农业出版社, 1998: 212-273
- [7] 王慎强, 蒋其鳌, 钦绳武, 等. 长期施用有机肥与化肥对潮土土壤化学及生物学性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(4): 67-69
- [8] 谢建昌. 中国土壤的钾素肥力及农业中的钾管理[M]//沈善敏. 中国土壤肥力. 北京: 中国农业出版社, 1998: 274-340
- [9] 张玉铭, 胡春胜, 毛任钊, 等. 华北太行山前平原农田生态系统中氮、磷、钾循环与平衡研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1863-1867
- [10] 陈新平, 张福锁, 崔振岭, 等. 小麦-玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006: 53-91
- [11] 张玉铭, 张佳宝, 胡春胜, 等. 华北太行山前平原农田土壤水分动态与氮素的淋溶损失[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 17-25
- [12] 张立周, 王殿武, 张玉铭, 等. 数字图像技术在夏玉米氮素营养诊断中的应用[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(6): 1340-1344
- [13] 贾良良. 应用数字图像技术与土壤植株测试进行冬小麦氮营养诊断[D]. 北京: 中国农业大学, 2003
- [14] 王兴仁, 曹一平, 张福锁, 等. 磷肥恒量监控施肥法在农业中的探讨[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2/4): 59-64
- [15] 李秋梅. 高肥力土壤上冬小麦-夏玉米轮作中磷钾合理施用的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2001
- [16] 吕家珑, 张一平, 张君常, 等. 土壤磷运移研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(1): 75-82
- [17] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29: 105-110
- [18] Maria D C H, Jose J. The Olsen-P method as an agronomic and environmental test for predicting phosphorus release from acid soils[J]. Nutrient Cycling of Agroecosystem, 2007, 77: 283-292
- [19] 陈芝兰, 张涪平, 蔡晓布, 等. 秸秆还田对西藏中部退化农田土壤微生物的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(2): 696-699
- [20] 孙星, 刘勤, 王德建, 等. 长期秸秆还田对土壤肥力质量的影响[J]. 土壤, 2007, 39(5): 782-786