

我国小麦最佳养分管理研究进展

刘晓燕, 何萍, 金继运

中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京, 100081

摘要: 科学的养分管理对于实现小麦的优质、高产、养分高效以及保护环境至关重要。本文主要介绍了我国小麦生产概况和小麦需肥规律, 分析了我国小麦施肥中存在的主要问题, 在总结国内外作物养分管理方法的基础上, 提出我国小麦养分最佳养分管理要点: 掌握养分正确的施用量、正确的施用时期、选择正确的肥料种类和施肥方法。最后, 针对我国小麦养分管理现状, 探讨了我国未来小麦养分最佳管理的方向。

关键词: 小麦, 养分管理, 高产优质

小麦是世界第一大粮食作物, 而中国又是世界上小麦播种面积最大、总产最高的国家。播种面积占世界总播种面积的 10.5%, 总产占世界总产的 15.3%, 但是单产不足荷兰、英国单产的 50%, 还有待提高。我国春小麦主要分布在长城以北, 播种面积不到全国小麦总播种面积的 7%; 北方和南方冬小麦播种面积分别占全国小麦总面积的 60% 和 33% 左右。近十年来, 我国优质小麦种植面积大幅度提高, 并逐步形成三个优质小麦生产带: 黄淮海强筋小麦带、大兴安岭沿麓强筋小麦带和长江下游弱筋小麦带。据统计, 2008 年我国优质小麦收获面积达 2.4 万亩, 达到小麦总播种面积的 67%, 主要集中在河南、山东、河北三省。

小麦养分管理是小麦生产的重要组成部分。在强调粮食安全、农业可持续发展的当今, 小麦科学的养分管理目标逐渐呈现多元化, 不仅要提高产量、改善品质、提高经济效益, 还要减少环境风险。虽然, 我国的养分管理正在向这些多重目标努力, 但仍存在很多的问题, 主要表现在: 1) 部分麦区氮肥施用过量, 尤其是高产麦田氮肥施用过量的问题十分严重, 导致氮肥利用率较低, 在部分高肥力麦田肥料氮的利用率不到 10%, 同时给环境带来巨大压力^[1-3]。2) 养分施用不平衡。部分地区小麦磷、钾施用比例偏低, 如杨博等^[4]对山西省小麦化肥施用状况进行分析, 发现氮肥用量占到总肥料用量的 60%, 磷大约占 30%, 而钾肥仅占 10%。3) 施肥方式不当。在我国小麦生产中, 底肥和追肥比例不协调的现象普遍存在, 一些地区小麦底施氮肥量占全生育期施氮总量的 70% 以上, 造成小麦苗期肥料过剩, 后期肥力不足^[5]。4) 中、微量元素缺乏问题未引起重视。与第二次土壤普查资料相比, 目前我国农田土壤有效锌亏缺比例已经由 20 多年前的 51.1% 上升到 65.1%, 有效硫由 28% 上升到 34%。有效镁、铜和铁的缺乏比例分别上升了 10.9、16.7 和 19.4 个百分点^[6-7]。但我国中、微量元素的施用一直没有得到重视, 这必然严重制约我国小麦产量和品质的进一步提升。

本文将在总结小麦需肥规律的基础上, 结合我国小麦施肥中的实际问题, 对小麦最佳养分管理方法进行总结和分析。

1 小麦养分需求规律

小麦的需肥规律是指小麦随各生育时期的阶段性变化而表现出的对养分吸收的相对数量及动态变化趋势, 是指导小麦养分管理的重要理论依据。

1 国际植物营养研究所资助项目 (IPNI 33)

1.1 小麦养分需要量

小麦一生需要氮、磷、钾及多种中、微量元素，具体养分需求量又因气候条件、土壤肥力、小麦类型、品种等差异而不同。李斐^[8]通过研究内蒙古地区种植的6种春小麦的养分需求量，发现每生产100公斤子粒平均吸收N 3.38公斤、P 0.70公斤、K 2.56公斤、Ca 0.15公斤、Mg 0.26公斤、S 0.28公斤、Fe 51.6克、Mn 7.03克、Cu 1.57克、Zn 3.81克。党红凯^[9]通过对河北9种冬小麦的养分吸收量的研究，发现每生产100公斤籽粒平均吸收N 3.65公斤、P 0.71公斤、K 3.86公斤、Ca 0.8公斤、Mg 0.34公斤、B 0.95、Zn 4.47、Mn 11.83克。与春小麦相比，冬小麦单位养分需求量相对较高。另外，不同类型专用小麦对养分的吸收量基本表现为：强筋小麦 > 中筋小麦 > 弱筋小麦^[8,10-11]。

1.2 小麦养分吸收特性

根据小麦的生育进程，春小麦主要划分为苗期、分蘖期、起身期、拔节期、孕穗期、抽穗期、开花期、灌浆期和成熟期，冬小麦在分蘖期和起身期之间还有越冬期和返青期。小麦氮、磷、钾的吸收强度基本表现为：拔节-孕穗期 > 分蘖（或冬小麦起身期）-拔节期 > 孕穗-开花期，尤其是孕穗期吸收强度最大^[8-9]。出苗至分蘖期磷素吸收量较少，但却是小麦需磷敏感期。冬小麦越冬前氮、磷和钾的吸收量均较少；冬小麦返青至拔节期，各养分积累量增大，此期积累氮、磷、钾分别占其总吸收量的31.4%、28.5%和41.7%；拔节至扬花期仍是养分积累的重要时期，氮、磷和钾积累量分别占28.9、44.3%、41.9%；开花期到成熟期，植株对养分的吸收减少，氮和磷分别占总量13.8%和9.1%，而钾反而出现负吸收现象^[12]。总之，氮磷钾养分的吸收主要集中在返青-开花期，春小麦在拔节后养分吸收规律与冬小麦相似。

小麦对Ca、Mg、S的吸收强度最高值均出现在拔节至孕穗期。随着生育期的推进，Ca、S的累积吸收量在灌浆期达到最大值，成熟期有所下降；而Mg的累积一直呈现增加的趋势^[13-15]。小麦对Fe、Mn、Cu、Zn吸收均集中在拔节至乳熟期，并在乳熟期养分积累量达到最大值，后期有流失现象。但B积累量一直呈现增加趋势，至成熟期达到最大积累量，最大吸收强度出现在开花到成熟期，其次是拔节到孕穗期。总之，冬小麦对微量元素吸收的大致趋势是：越冬前较多，返青、拔节期吸收量缓慢上升，孕穗至乳熟期吸收量较多，约占总吸收量的50%；春小麦微量元素在分蘖期前吸收量较小，主要集中在拔节至乳熟期，此阶段吸收量占总吸收量的70%左右^[8-9]。

2 小麦最佳养分管理措施

就养分管理尺度而言，有大尺度和小尺度之分。大尺度的变异主要表现在土壤类型、气候条件等的差异；而小尺度则主要表现在土壤养分的空间变异上。本文介绍的小麦养分最佳管理侧重于小尺度的实地养分管理，其四个要点包括：正确的施用量、正确的施用时期、正确的施用方法和正确的肥料种类，力图通过以上措施的综合应用，最终实现小麦高产、优质、增收、环保的多重目标。

2.1 保证养分平衡，确定合理养分用量

土壤测试是实现小麦定量化养分管理的第一步。土壤养分测试方法很多，主要有常规分析法、土壤养分系统研究法（ASI）、速测法等。根据土壤养分测试结果，推荐施肥量是实现小麦养分优化管理的第二步。从定量施肥的依据来划分，主要归纳为以下三类：第一类是地力分区法；第二类是目标产量法，包括养分平衡法和地力差减法；第三类是田间试验法，包括肥料效应函数法、养分丰缺指标法、

氮磷钾比例法。其中，目标产量法是目前我国使用较为普遍的施肥推荐方法，它是根据作物产量的构成，由土壤和肥料两个方面供给养分的原理来计算施肥量。养分平衡法是目标产量法进行推荐施肥的常用方法，计算公式如下：

$$\text{肥料需要量} = \frac{\text{目标产量} \times \text{作物单位产量养分吸收量} - \text{土壤养分测定值} \times 0.15 \times \text{校正系数}}{\text{肥料养分含量} \times \text{肥料当季利用率}}$$

式中，作物单位吸收量 \times 目标产量=作物吸收量；土壤测定值 \times 0.15 \times 校正系数=土壤供肥量；校正系数=(空白区产量 \times 作物单位养分吸收量)/(养分测定值 \times 0.15)。这一方法的优点是概念清楚，容易掌握，但“校正系数”需要通过试验，加以调整。

2.1.1 氮肥用量

2.1.1.1 氮肥总量推荐

氮素是限制作物生长和产量形成的主要因素，氮肥的管理是小养分管理的核心和重点，它不仅关系到作物的高产、优质，而且若使用不当还会给环境造成严重威胁。我国农田土壤普遍缺氮，绝大部分土壤施用氮肥都有一定的增产效果。因此在实行推荐施肥时，氮肥不同于磷、钾肥，不明确是否需要施用，而是确定其适宜的施用量。但由于氮在土壤中的转化过程十分复杂，损失的途径也很多，如氨挥发、反硝化以及过量灌溉和遇到大量降雨而造成的硝酸盐向地下淋洗等，对环境的影响也最大(如对地下水、土壤和水等)，所以，准确的氮肥用量推荐仍是氮肥推荐的难点和关键问题^[16]。

小麦氮肥推荐包括总量推荐和追肥用量推荐。目前，在国际上普遍根据土壤硝态氮测试值决定施氮量。美国主要是根据硝态氮含量作为氮肥推荐的分级指标，而欧洲、拉丁美洲的一些地区将硝态氮作为土壤氮素供应的一部分，计算公式如下：

$$Nf = [(Nc + Nr) - ((Ni/ei) - (Nmin/em))]/ef$$

Nf: 肥料N; Nc: 作物需N量; Nr: 成熟期残留无机氮量; Ni: 播种时期的无机氮，一般在播种前采样深度为60厘米; Nmin: 可矿化的氮量; ei: Ni的利用率; em: Nmin的矿化率; Nf: 肥料N的利用率。一般而言，Nr视作0或Ni的一部分^[17]。

美国、欧洲等在氮肥用量推荐上均强调养分的综合管理，涉及的因素较多，如上茬作物残留氮、土壤无机氮、环境输入的氮等。美国各个州都有适合本地的养分推荐量，如内布拉斯加州在制定施氮量时不仅包括土壤无机氮水平、降水量多少等因素，还将价格因素纳入施肥量推荐中，肥料或作物价格发生变化，施肥量也随之调整，并制成表格，以便农户查用^[18]。目前，我国国家测土施肥重点实验室，根据养分分级范围、相应作物、目标产量制定了一套比较完整的推荐施肥方法。氮肥的施用量主要是根据土壤有机质含量、作物类型及目标产量决定的，在此基础上，根据土壤速效氮(铵态氮+硝态氮)水平进行调整^[19]。当然这套系统具有操作简单快速的特点，但在养分推荐用量还比较粗放，对环境因子考虑较少。因此，为提高我国小麦氮肥推荐的精度，有必要借鉴国外的方法，将由灌溉、降水等输入农田的氮素、土壤有机氮的矿化量、土壤本身的有机质、速效氮水平、氮肥利用效率、肥料和小麦价格等诸多因素尽可能包含在内，并逐步实现定量化。另外，不同类型小麦对氮肥的需求量也有明显差异。曹承富等^[20]研究表明，中筋小麦皖麦44达到最高产量和最佳品质的施氮量分别比强筋小麦皖麦38高出约8%和35%，因此，在确定氮肥用量推荐时，也要考虑小麦类型的差异。

2.1.1.2 生育期养分管理

关于小麦氮素诊断的研究始终是国内外研究的热点和难点。通过测定植株全氮含量确定追氮量,是氮素诊断和推荐中比较成熟的方法,但该方法破坏植株样本,并耗费大量的时间、人力和物力,在生产中难以快速的推广、应用。随着科技的发展,一些新的追肥推荐技术,如硝酸盐快速诊断技术、叶绿素仪(或叶色卡)诊断技术、光谱遥感技术等相继问世,它们可迅速、准确的对田间作物氮营养状况进行监测,作为测土施肥的辅助措施,及时提供追肥所需要的信息,如追肥时间、追肥量等。

研究发现,作物的硝酸盐含量可灵敏的反映作物氮素营养水平,小麦的硝酸盐快速诊断技术也应运而生^[21-22]。在美国、法国等国家小麦生产中采用播前土壤硝态氮测试和拔节期植株硝态氮测试相结合的方法进行氮肥用量推荐。我国利用小麦植株硝酸盐进行氮素快速诊断的研究也取得一些成果。张国印等^[23]研究表明,采用冬小麦拔节期植株硝态氮含量进行植株氮素营养评价是可行的,并确定河北曲周县冬小麦拔节期植株硝态氮含量缺乏临界值为1000毫克/公斤,充足的指标为1300毫克/公斤;冬小麦拔节期合理的氮肥追施量应控制在5-10公斤/亩。还有,在我国“北方精准农业示范区项目”开发的“北京地区冬小麦-夏玉米轮作植株营养诊断推荐施肥”系统中,拔节期茎部硝酸盐含量充足的指标为1800毫克/公斤,高过此值则无需追肥;硝酸盐含量在900-1000毫克/公斤,冬小麦拔节期氮肥追施量为5公斤/亩。大量研究表明,小麦拔节期植株诊断硝酸盐临界值范围较广,一般在1000-2500毫克/公斤^[17],且该临界值易受气候、土壤、作物品种、种植密度等因素的影响,所以,若以小麦植株硝酸含量为基础的氮肥推荐区域偏大,则会使精度降低。这种方法在若要大面积推广应用,仍需开展大量研究工作,明确不同地区、不同类型、品种小麦硝酸盐含量的临界值,进而制定更加科学的氮肥推荐量。

叶片的叶绿素含量与小麦的氮素营养显著相关,叶绿素测定仪在氮素诊断和氮肥推荐上的研究和应用也越来越多。由于产量和蛋白质形成不同步,在预测产量时,一般选用小麦拔节期上部展开叶片进行测定,而预测蛋白质含量则选取开花期旗叶进行测定^[24-25]。SPAD法具有操作简单、数据获取快速、对植株没有损害等优点^[26-29]。但由于SPAD法所需工作量较大,且仪器价格昂贵,限制了其在生产中推广应用。研究发现,LCC(Leaf Color Chart)值与SPAD值有很好的相关性^[30]。作为一种价格便宜的叶绿素仪替代品,采用叶色卡进行氮肥推荐在许多国家被尝试使用。在水稻上,利用LCC进行植株氮素诊断和氮肥推荐的研究较多^[31-33]。目前在我国东北和南方部分地区实施的水稻实地氮肥管理技术,就是在确定总的施氮量的基础上,在水稻主要生育期用快速叶色卡(LCC)或叶绿素仪观测叶片氮素状况,并依此指导施肥,从而最大限度地提高肥料利用效率,获得水稻优质、高产^[34-36]。同样,利用简单快速的LCC诊断方法进行植株养分快速诊断,在小麦氮素养分管理上也具有一定的应用潜力^[37-39],但目前关于小麦LCC指标体系在我国开展的研究还很少。SPAD和LCC的预设阈值是作物实地氮肥管理的关键技术参数。但是值得注意的是,氮素营养状况的SPAD或LCC的阈值并不是一个固定值,但其在实际应用中往往受作物的类型、品种、生育期、生长环境等的影响^[34,37,40]。另有报道称,可以用SPAD足量指数、叶片上下部SPAD读数的比值、叶色差RSPAD等代替SPAD阈值来消除上述因子干扰,指导作物施肥^[41-43],但稳定性还有待于验证。虽然,利用SPAD或LCC指标进行氮肥推荐得到快速发展,但如何进一步克服外界因素的干扰、提高诊断的可靠性、普适性仍是下一步努力的方向。

近20年来,高光谱遥感技术进行作物氮素实时监测和快速诊断一直是农业应用研究的热点,围绕小麦植株氮素营养水平与光谱反射特征的关系进行了大量的理论基础研究^[44-46]。Stone等^[47]发现在近红外波段冬小麦冠层光谱反射率随氮肥用量增加而增加,两者呈显著或极显著正相关关系,应用小麦

的反射光谱指导变量施肥,可节省N 2.1-3.8 公斤/亩,明显提高了总氮利用效率,并减少因过度施肥对环境造成的污染。宋晓宇等^[49]利用扫描式成像光谱仪获取冬小麦长势和小麦叶面积指数,并根据目标产量的需氮量和测得的作物吸收氮素的差值,提出了氮肥的适宜用量。但由于冠层光谱反射特征受到植株叶片水分含量、土壤覆盖度、大气对光谱的吸收等因素的影响,也限制了其在作物氮素诊断中的可靠性和普及性。

综上所述可以看出,各项植株氮素诊断技术都有其优缺点。虽然这些新技术的应用在我国还均处于探索阶段,各种技术的指标体系的适用性还有待完善。但外界环境差异较小的小区域内,应用这些新兴技术,仍然有助于提高小麦氮素营养诊断的速度和精度,增加对小麦生长期氮肥的调控效果。

2.1.2 磷、钾肥用量推荐

适宜的磷、钾养分不仅可提高小麦产量,改善品质,而且能够增加作物抗性。我国耕地全磷含量大体上从南向北有增加的趋势。由于磷肥的当季利用率为很低,移动性差,大部分的磷都残留在土壤中。因此近些年,我国主要麦区土壤速效磷水平有所增加^[7]。我国大部分地区,施钾均有效,目前就全国范围而言,东北和长江流域农田土壤钾素亏缺比例相对较高,这些地区应重视补充钾肥。

目前关于磷、钾肥的养分管理主要通过土壤测试和养分平衡进行监控。根据目标不同,主要分为两种方法: Nutrient sufficiency 和 Built up and Maintenance^[17,49]。在养分水平较低的土壤上, Nutrient sufficiency 的目标是追求最大化效益和最小化养分用量、经济投入,主要是满足当季作物需求,减少土壤中残留,所以一般磷、钾每季都需要施用。“Built up and Maintenance”策略,即构建并维持一定的土壤有效磷、钾水平以保持产量的稳定,同时防止过高的土壤磷、钾累积,以减少由土壤淋失和淋洗等造成的环境危害。对于土壤有效养分含量较高的田块,采用少施或者不施的策略以适当降低其在土壤中的累积;在养分含量较低的土壤上,这种方法不仅要满足当季的需要,还要将土壤养分逐渐提高到临界值以上水平,这一般这需要4-8年的时间。但当土壤磷、钾含量超过临界值后,施肥即以维持土壤肥力为主要目标^[49]。在英国,旱地作物土壤有效磷的目标值是16-25 毫克/公斤;旱地作物土壤有效钾的目标值是120-180 毫克/公斤^[50]。Tang 等^[51]在北京、郑州、杨陵等地的定位试验表明,冬小麦的土壤 Olsen-P 临界值为12.5-19.0 毫克/公斤。王兴仁等^[52]考虑长期施肥效应,建议将黄淮海平原壤质土谷类作物的有效磷、钾临界水平分别定为 Olsen-P 10-15 毫克/公斤、K (醋酸铵法) 90-100 毫克/公斤,每3-5年监测1次。

我国国家测土配方施肥实验室主要是根据 ASI 方法测定的土壤速效磷含量,将土壤速效磷、速效钾分为6个等级,并以小麦不同目标产量制定了相应的施肥量,根据我国小麦主产区400-600 公斤/亩的目标产量,需要施 P_2O_5 4-6 公斤/亩,这种方法与 Nutrient sufficiency 法类似。当然这种推荐用量只是一个参考用量,并没有区分小麦品种等在养分需求上的差异,还需要根据不同地区的试验进行校验。中国农业大学在我国测土施肥实施中主要采用了磷、钾恒量监控技术,类似于 Built up and Maintenance 法,实现了磷、钾养分的简化管理。

另外,在确定小麦磷、钾施用量时,除了进行土壤养分测试外,还要考虑小麦类型的差异和不同地区轮作体系的差异。不同类型小麦吸磷、钾特性不同,适宜磷、钾肥用量也存在差异,如强筋小麦的适宜用量要高于中、弱筋小麦^[8,53]。在我国华北小麦-玉米轮作体系下,应将磷肥重施在小麦上,玉米上少施或只利用小麦磷肥的后效即可。在钾肥用量推荐时,在施用有机肥或秸秆还田的地块,一定要减去因有机肥施入和秸秆还田所带入的钾量。

2.1.3 中、微量元素用量推荐

中微量元素需要量虽然不多，但是它们在保证植物的正常生长生长发育方面的重要性与大量元素是相同的。目前我国亏缺面积较大的中量元素主要是S和Mg，微量元素主要为：Zn、Mn、Fe、B。大量试验研究已经证实，适量的补充以上元素在相应地区可以取得明显增产效果（表1）。

表1 我国部分地区施用S、Mg、Zn、Mn对小麦的增产效果

小麦季节	试验年份	试验点	施用量 (公斤/亩)	增产		文献来源
				(公斤/亩)	(%)	
S						
冬小麦	1997	安徽凤阳	3	52	14.3	[56]
春小麦	2002	甘肃和政县	2.6	22	7.6	[7]
春小麦	2003	黑龙江克山	2	27	10.4	[57]
春小麦	2003	山东泰安	6	74	10.4	[58]
冬小麦	2005	河南郑州	3	60	15.6	[55]
Mg						
冬小麦	2001	云南曲靖	1	29	8.7	[7]
冬小麦	2004	四川简阳	2.4	10	3.7	[7]
Zn						
冬小麦	2001	江苏连云港	1.1	42	12.3	[59]
冬小麦	2001	西藏贡嘎县	0.5	67	24.0	[7]
冬小麦	2003	山西临汾	0.35	43	9.1	[7]
冬小麦	2004	山东鄄城	0.46	67	19.2	[60]
Mn						
冬小麦	1998	四川简阳	0.65	40	14.3	[61]
春小麦	2000	山西应县	0.43	39	16.2	[62]
冬小麦	2004	云南弥勒县	0.65	67	17.3	[63]

对于中量元素，在北方的春麦区，如内蒙古、甘肃、东北地区等地缺硫问题突出。我国东北平原地区农田土壤有效硫亏缺面积占总面积的78.6%^[54]。制定适宜施硫量要综合考虑硫肥对产量与品质的影响，如刘万代^[55]研究表明，在沙薄地上弱筋小麦豫麦50优质高产的需硫量远低于中筋小麦豫麦49，其适宜施硫量分别为1.5和3.0公斤/亩。南方酸性土壤上有效镁含量相对较低，云南、江西、福建等省缺Mg问题开始显现，如在IPNI在云南曲靖的试验发现施用1公斤/亩的Mg可增产8.66%，同时可提高小麦面筋含量^[7]。

对于微量元素，在我国小麦主产如华北冬小麦区的山东、河北、河南、山西等省以及南方麦区的安徽、江苏等省的大部分地区缺Zn问题比较突出，在部分地区缺Zn已经成为小麦产量提高的首要限制因子。在西北、西南一些地区，缺Mn现象也已显现，应注意补充Mn肥。

根据IPNI测定的4万多个土壤样品的测试结果，发现西北麦区包括内蒙地区的微量元素水平较低，在小麦生产中要特别注重补充微肥Zn、Mn、Cu、Fe等；华北冬麦区要注意补充Zn和Fe；南方注意

补充Zn和B。对于中量元素，在北方的春麦区应注意补充S肥。南方的云南、江西、福建等地，小麦还需要施用适量的Mg肥。

2.2 正确的施用时期和比例

小麦每个生育时期有每个生育的吸肥特点，因此养分管理必须要以小麦对养分的阶段性需求为指导。小麦生育期间进行适量追肥是获得小麦高产、优质、提高肥效，减少环境污染的重要措施。为了防止降水造成氮素淋失，提高氮肥利用率，欧洲一些国家如英国，并不提倡将氮肥作底肥施用，提倡在作物主要需肥期前施用。

2.2.1 氮肥施用时期和比例

小麦在生育期间一般要进行1-3次追肥，分别在分蘖、拔节、孕穗期进行。适宜的施氮时期不仅能促进作物高产、优质，还能提高养分利用效率^[11, 64]。一般为认为基追比为5:5比较合适，但具体的基、追比例还要根据土壤的肥力、作物品种、降水量等条件而定。

2.2.1.1 根据土壤肥力、质地确定追氮时期和比例

华北地区冬小麦一贯注重基肥的施用，但基肥施用比例过大会导致小麦前期群体过大，后期氮素缺乏，影响灌浆，最终减产。“氮肥后移”技术可以解决这一生产问题，将氮素的基肥比例减少到50%，追肥比例增加到50%，土壤肥力高的麦田底肥比例为30%-50%，追肥比例为50%-70%。值得注意的是，这项技术的实施必须是在土壤肥力水平较高的情况下进行，在低肥力土壤上，基肥比例不宜过低，否则影响小麦前期生长，无法保障小麦分蘖的正常进行。

不同土壤肥力水平下，小麦对不同施用时期的氮肥利用效率也存在明显差异。王月福等^[65]利用土柱试验和¹⁵N示踪技术研究发现，高肥力土壤小麦对追施氮肥的利用率较高，而在低肥力土壤小麦则基施氮肥的利用率较高，这也从另一个侧面说明在高肥力土壤上氮肥以追施为主，在低肥力土壤以基施为主的必要性。

土壤质地决定了土壤的保肥能力。山东、河南小麦主产区主要为砂质壤土、粉土、砂质壤土等，宜增加追肥次数，以减少氮肥淋失。南方的贵州、云南、广西等地土壤质地粘重的地区可以减少追肥次数。西北地区虽然主要为砂土、壤土，但是降水较少的旱区麦田，可增加基肥投入量，氮肥2/3作底肥，1/3作拔节追肥，增产效果较好。

2.2.1.2 根据小麦类型确定追氮时期和比例

在小麦品质指标中，氮肥对蛋白质的影响最大^[66-67]。但氮肥施用时期对产量和蛋白质含量的效应并不同步，高蛋白的氮肥最大效应期晚于产量的氮肥最大效应期。为了提高小麦籽粒品质，一定要重视后期追氮^[66, 68-70]。研究发现，增加植株中后期氮素吸收与积累，有利于提高中、强筋小麦籽粒产量和改善品质，而适当降低植株氮素吸收与积累特别是中后期氮素积累，有利于实现弱筋小麦的优质高产。强筋小麦植株吸氮能力强，实现优质高产时宜采用基肥:分蘖肥:拔节肥:孕穗肥为3:1:3:3或5:1:2:2的运筹比例，中后期氮肥施用比例高，氮肥利用率也高；相反，弱筋小麦植株吸氮能力较弱，前期适用比例较高，孕穗期氮肥施用比例相对要低或不施，实现优质高产时宜采用基肥:分蘖肥:拔节肥为7:1:2或基肥:拔节肥:孕穗肥为7:2:1的运筹方式^[11, 71]。

2.2.1.3 根据水分条件决定追氮时期和比例

氮肥施用效果总是与水分密不可分。水分越充足，肥料的效果越突出。在有灌溉条件的地区，小麦对水分的需要可以随时补充，不受水分胁迫的限制，氮肥分次施用效果较好；但在有限灌溉的地区氮肥宜早施，随着施氮时期后延，氮肥效益明显下降^[72]。

2.2.1.4 生育后期喷施叶面肥

在抽穗—灌浆期进行追氮，可促进蛋白质合成和碳水化合物的转化，改善小麦品质。由于抽穗期以后根系吸收能力减弱，而土壤施氮作用较差，采用叶面喷施对增加产量和品质的效果较好，并提高氮肥利用率^[73]。

2.2.2 磷肥施用时期

小麦的磷素营养临界期在苗期，由于苗期气温低，土壤供磷能力差，因此磷肥宜早施，可作为种肥或基肥施用。由于磷素在作物体内再利用的运转率较高，可达吸收量的70%-80%，所以磷肥一般用作基肥即可满足整个生育期的需要。但有研究发现。在高产田上70%作基肥，30%在倒四叶期追施，效果较好，可获得小麦高产；基肥和追肥分别满足苗期磷临界期和拔节至开花期吸磷高峰的需要^[74]。

2.2.3 钾肥施用时期

长期以来，在小麦生产中钾肥多用作基肥一次施入。但小麦对钾素的吸收也存在阶段性差异，在拔节期前后钾素吸收量较大。在质地较轻的土壤上保肥能力弱，钾肥分次施用效果较好，如于振文等^[75]在山东土壤速效钾为118.5和79.0毫克/公斤的麦田上进行试验发现，基施3公斤/亩，拔节期再追施3公斤/亩，能够使土壤速效钾供应与小麦钾素需求同步，促进钾素吸收，同时提高植株对氮的吸收，减少氮肥损失。

2.2.4 中、微量元素的施用时期

冬小麦对中、微量元素吸收的大致趋势是：越冬前较多，返青、拔节期吸收量缓慢上升，抽穗至成熟期吸收量达最高^[9]。在小麦苗期和籽粒成熟期，应增强中、微量元素营养，前期基施结合后期喷施效果最好。为了提高喷施效果，一般在晴天傍晚或早晨进行。

2.3 正确的肥料种类和施用方法

选择适宜的施肥方法也是实现最佳养分管理的重要一环。相对于移动性较强的氮素，正确的施用方法对提高磷、钾及微量元素有效性的作用更大。

2.3.1 氮肥种类和施用方法

我国氮肥种类主要包括尿素、硝铵、碳铵、硫铵等品种，其中尿素是主要品种，占中国氮肥总消费量的60%以上。尿素适用于各种土壤，也适合作根外追肥。硝态氮肥施入土壤不易被土壤吸附，易被雨水或灌溉淋失，故不宜大量作基肥。碳酸氢铵具有较强的腐蚀性和挥发性，对种子有强烈的腐蚀作用，因此不宜作种肥。硫铵宜施在北方缺硫的麦田。

由于不同专用型小麦的氮素吸收特性存在差异，因此在选择氮肥种类时，要考虑不同专用型小麦

对产量和品质的双重需求。如强筋型小麦豫麦34对蛋白质含量要求较高,在施用酰胺态氮下,能满足其专用型的要求;中筋型豫麦49对蛋白质含量要求一般,施用铵态氮比较理想;弱筋型豫麦50对蛋白质含量的要求较低,虽然在施用酰胺态氮下蛋白质含量较高,但不能满足其专用型的要求,施用铵态氮效果较好。若以追求小麦产量为目标,则强筋型豫麦34宜用硝态氮,而中筋型豫麦49和弱筋型豫麦50宜用酰胺态氮。考虑小麦产量与品质的综合目标,强筋型小麦宜施铵态氮,中筋型小麦宜施酰胺态氮,弱筋型小麦宜施硝态氮^[76]。

2.3.1.1 氮肥深施

氮肥深施技术是提高小麦氮肥利用率、增产和增收的重要措施之一。氮肥深施可增强土壤对铵态氮的吸附,减少氨挥发、随水流失以及反硝化脱氮损失,提高氮素利用率^[77-79]。表施碳酸氢铵或尿素通过氨挥发损失可高达50%,但当这些氮肥在深施的条下,氨挥发损失率很容易降低到10%以下,氮肥施用深度一般为10-15厘米^[80-81]。

2.3.1.2 氮肥结合灌溉有利于提高氮肥利用效率

水分和养分是影响小麦产量的两个关键因素,尤其是在旱区。氮肥施用后配合灌水可明显提高小麦产量,提高肥料利用效率。在河南、河北、宁夏、北京等地的小麦田间试验表明,尿素表施后随即灌水,其氮素损失率低于施肥前灌水的处理,增产效果接近氮肥深施处理^[78,82]。

2.3.2 磷肥种类和施用方法

我国磷肥种类主要包括:磷酸二铵、磷酸一铵和重钙。磷酸一铵为弱酸性肥料,磷酸二铵为弱碱性肥料,重钙为酸性肥料。磷酸铵适合于各类土壤、作物,可做基肥和追肥。重钙最好施在北方石灰性土壤上,在南方酸性土壤上宜与石灰、有机肥配合施用。

磷肥提倡集中施用和分层施用。磷在土壤中扩散速率小,迁移慢,为了减少水溶性磷肥与土壤的接触面积,减少磷固定,尽量增加磷与根系的接触机会,促进根系吸收,磷肥不宜撒施,集中施用效果较好,如条施、穴施等^[83]。小麦在不同生育期其根系发育和分布状况明显不同,因此磷肥分层施用效果较好,即苗期根系分布较浅,气温较低,应浅施或作种肥(5厘米)^[84];随着小麦根系的生长,后期利用的磷肥应深施(约10厘米)^[85]。另外,磷肥极易被土壤固定,因此与有机肥配合施用效果较好。

2.3.3 钾肥种类和施用方法

我国应用的钾肥主要包括氯化钾和硫酸钾。氯化钾不宜施在盐碱地。在东北和内蒙缺硫的麦田,施用硫酸钾的效果优于氯化钾。在南方酸性土壤上,施用硫酸钾效果也较好,有利于减轻铝毒。

钾在土壤中的移动性大小介于氮和磷之间,钾肥一般作为基肥施用。播种前,与撒施相比,钾肥作种肥或行侧带状施用效果较好。但在华北地区砂质土壤较多,钾肥不宜全部一次施用基肥,而应该加大追施的比例,分次使用,减少淋失。质地粘重的土壤对钾素的固定能力强,为达到作物高产,施肥量可相应大些。另外,为避免表土干湿交替所引起的钾素固定,钾肥宜深施,促进根系吸收^[86]。

2.3.4 中、微量元素种类的施用方法

中、微量元素可用作基肥、种肥和追肥。硫肥主要包括硫酸盐类和单质硫肥。单质硫需在播种前

表施,以加快其氧化,提高有效性。在干旱条件下,硫肥作为种肥或行侧带状施用效果较好;若在水分充足的条件下,硫酸根移动性较强,撒施效果也较好。由于镁在土壤中移动性较小,易深施。

前期的基肥或种肥可以满足小麦生育前期对微量元素的需要,对于需要量较大的元素,在生育中后期上需要配合根外追肥。微量元素铁、锰、铜、锌等在土壤中的移动性比磷更弱,因此做种肥或叶面肥效果要优于撒施^[87]。研究表明,硫酸锌基施和拌种的效果优于喷施^[60]。由于Mn在小麦体内再移动能力不如Zn,硫酸锰喷施效果优于基施和拌种^[62,88],且前期拌种配合后期喷施效果更佳。另有研究表明,Zn肥有后效,施Zn肥的在小麦收获后,土壤Zn含量明显增加,可以隔一年或两年施一次^[89-90]。B比金属微量元素的移动性强,对种子有毒害,因此不宜作种肥,叶面喷施的效果较好。

2.3.5 重视养分配合施用

实践证明,养分配合施用是提高养分利用率的有效措施。通过对IPNI在我国1995-2006年的213个小麦养分平衡试验的总结,发现我国小麦最高产量所需氮、磷、钾养分配比为1:0.6:0.65;最佳经济效益养分配比为1:0.59:0.51^[7]。另外,养分配合不仅讲究氮、磷、钾三要素配合,还有大量元素和中、微量元素配合,以及有机肥和无机肥料配合施用。

3 我国小麦最佳养分管理展望

综上,在特定地区,通过上述科学的小麦养分管理措施的实施,必会实现小麦的优质、高产和养分高效,降低养分流失量,优化农田生态环境。但如何在区域尺度上实现这一综合目标,是值得思考的问题。小尺度的养分管理是大区域养分管理的基础,我国在小尺度上,特别是田块尺度上,对小麦养分管理模式做了大量有益的研究和探讨,但总体上比较零散,目前从田块尺度向区域尺度扩展和集成,还存在一定困难。要在全中国范围内建立不同区域尺度科学的小麦最佳养分管理系统,实现养分的定量化管理,未来还需要开展以下几方面工作:

- 1) 深入开展养分管理的理论基础研究,探讨农田系统中各种养分迁移、转化规律,以及外界环境对它的影响,力求更加准确的预测土壤供肥能力,量化施肥量与养分损失的关系;

- 2) 广泛开展不同地区小麦主推类型、品种对养分的反应特性研究,寻求目标产量、品质与小麦施肥量、施肥时期的关系;

- 3) 充分利用计算机信息系统,借鉴国际上养分资源综合管理的先进思想和技术,建立区域尺度的小麦施肥专家系统和小麦生长模型。虽然,我国目前也建立了多种多样的施肥推荐模型,但真正大规模应用的并不多。众所周知,小麦的生长一个动态的过程,因此真正的小麦最佳养分管理必须与小麦实际生长状况相结合,与作物栽培、气候、水分等因子综合起来,随时根据小麦的生长变化,调整养分管理措施,否则很难实现“最佳”。因此,通过方程对各因子之间的相互关系进行量化计算,建立或改善区域性小麦生产模型是未来小麦最佳养分管理的一个重要研究方向。近些年,国内外关于小麦生产模拟模型研究也取得了长足进展,其中在小麦上应用较广的便是CERES-wheat模型,我国也开发了WCSODS模型等。但这些模型的应用均存在区域局限性,要提高模拟精确度,就必须加强多学科协作,针对具体地区的水、热、气、土等条件开展大量有针对性的试验,积累试验资料,寻求更贴合实际的模型参数,结合其它栽培措施最终构建适合本区域的作物生产模型或修正现有模型,以进一步优化我国小麦养分最佳管理体系。

参考文献:

- [1] 介晓磊, 韩燕来, 谭金芳, 等. 不同肥力和土壤质地条件下麦田氮肥利用率的研究[J]. 作物学报, 1998, 24: 884-888.
- [2] Chen X. P. Optimization of the fertilizer management of a winter wheat/summer maize rotation system in the Northern China Plain [D]. Germany: PhD thesis of Hohenheim University. 2003.
- [3] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P et al. On-farm estimation of indigenous nitrogen supply for site-specific nitrogen management in the North China plain[J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2008, 81: 37-47
- [4] 杨博, 陈明昌, 杨治平, 等. 山西省小麦、玉米养分资源管理现状及其养分平衡研究[J]. 山西农业科学, 2008, 36 (1) : 3-7.
- [5] 赵广才. 北方冬麦区小麦高产高效栽培技术. 作物杂志, 2008, (5): 91-92.
- [6] Liu Z. Characterization of content and distribution of microelements in soils of China. Portch S. International symposium on the role of sulphur, magnesium and micronutrients in balanced plant nutrition, Potash and Phosphate Institute of Canada, Hong Kong, China, 1991, 54-61.
- [7] 刘晓燕. 我国农田土壤肥力和养分平衡状况研究. 北京: 中国农业科学院博士后研究报告. 2008.
- [8] 李斐. 不同品种春小麦养分吸收动态模型及分布规律的研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士论文, 2002.
- [9] 党红凯. 超高产冬小麦营养元素吸收、积累与分配规律的研究. 保定: 河北农大硕士论文.
- [10] Zubaidi A, McDonald G K, Hollamby G J. Nutrient uptake and distribution by bread and durum wheat under drought conditions in South Australia[J]. *Austr. J. Exper. Agric.*, 1999. 39:721-732.
- [11] 朱新开. 不同类型专用小麦氮素吸收利用特性与调控. 扬州: 扬州大学博士论文, 2006.
- [12] 韩燕来, 介晓磊, 谭金芳, 等. 超高产冬小麦氮磷钾吸收、分配与运转规律的研究[J]. 作物学报, 1998, 24(6): 908-915.
- [13] Gregory P J, Crawford D V, McGowan M. Nutrient relations of winter wheat: 1. Accumulation and distribution of Na, K, Ca, Mg, P, S and N. *J. Agric. Sci.*, 1979, 93:485-494
- [14] 田奇卓, 贺明荣. 高产冬小麦钙镁元素吸收积累与分配规律的研究. 河南农业大学学报 1998, 32 (2): 138-143.
- [15] 吴静, 刘宝存, 孙明德. 冬小麦对硫的吸收及在体内的分布规律. 华北农学报, 2000, 15 (3): 103-108.
- [16] 朱兆良. 推荐氮肥适宜施用量的方法论刍议. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1):1-4.
- [17] Garcia F O. Nutrient best management practices for wheat fertilization practices for intensive wheat production in Southern Latin America. 2006
- [18] Blumenthal J M. Soil testing, recommended rates, and timing for fertilizing winter wheat with nitrogen, potassium, and micronutrients. 2006
- [19] 金继运, 白由路, 杨莉苹. 高效土壤养分测试技术与设备. 中国农业出版社. 2006.
- [20] 曹承富, 孔令聪, 汪建来, 等. 施氮量对强筋和中筋小麦产量和品质及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11 (01): 46-50.
- [21] Knowles T C, Doerge T A, Ottman M J. Improved nitrogen management in irrigated durum

wheat using stem nitrate analysis: II. Interpretation of nitrate-nitrogen concentrations. *Agron J.*, 1991, 83: 353-356

[22] Riley EA, Thompson T L, White S A, Ottman M J. Developing Sap Nitrate Tests for Durum Maricopa [R]. Forage and Grain Agriculture Report," College of Agriculture, The University of Arizona, Tucson, Arizona. 1999

[23] 张国印, 孙世友, 秦凤书等. 冬小麦植株氮素营养诊断指标研究[J]. 河北农业科学, 2006,(4):1-4.

[24] 李志宏, 刘宏斌, 张福锁. 应用叶绿素仪诊断冬小麦氮营养状况的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003,9(4):401-405.

[25] Debaeke P, Rouet P, Justes E. Relationship between the normalized SPAD index and the nitrogen nutrition index: application to durum wheat. *J. Plant Nutr.*, 2006, 29: 75-92

[26] Fox R H, Piekielek W P, Macneal K M. Using a chlorophyll meter to predict nitrogen fertilizer needs of winter wheat. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 1994. 25: 171-181.

[27] Prost L, Jeuffroy M H. Replacing the nitrogen nutrition index by the chlorophyll meter to assess wheat N status. *Agron Sust. Dev.*, 2007. 27 (4): 321-330.

[28] Scharf P C, Brouder S M, Hoelt R G. Chlorophyll meter readings can predict nitrogen need and yield response of corn in the north-central USA. *Agron. J.* 2006, 98: 655-665.

[29] 朱艳, 刘小军, 谭子辉, 等. 冬小麦叶色动态的量化研究. 中国农业科学, 2008, 41 (11): 3851-3857.

[30] Witt C, Pasuquin J M C A, Muters R, Buresh R J. New leaf color chart for effective nitrogen management in rice. *Better Crops.* 2005, 89: 36-39.

[31] Balasubramanian V, Morales AC, Cruz R T, Abdulrachman S. On-farm adaptation of knowledge-intensive nitrogen management technologies for rice systems. *Nutr. Cycl. Agroec. osyst.*, 1999, 53:93-101.

[32] Peng S, Garcia F V, Laza R C, et al. Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high-yielding irrigated rice[J]. *Field Crops Res.*, 1996, 47: 243-252.

[33] Yang W H, Peng S B, Huang J. L, et al. Using leaf color charts to estimate leaf nitrogen status of rice[J]. *Agron. J.*, 2003, 95: 212-217.

[34] 范立春, 彭显龙, 刘元英, 宋添星. 寒地水稻实地氮肥管理的研究与应用[J]. 中国农业科学 2005,38(9):1761-1766.

[35] 杨建昌, 杜永, 刘辉. 长江下游稻麦周年超高产栽培途径与技术[J]. 中国农业科学, 2008, 41(6): 1611-1621.

[36] Huang J L, He F, Cui KH, et al. Determination of optimal nitrogen rate for rice varieties using a chlorophyll meter. *Field Crop Res.*, 2008, 105 (1-2): 70-80.

[37] Maiti D, Das D. Management of nitrogen through the use of leaf color chart (LCC) and soil plant analysis development (SPAD) in wheat under irrigated ecosystem. *Arch. Agron. Soil Sci.*, 2006, 52(1): 105-112.

[38] Singh B, Y Singh J K. Ladha K F et al. Chlorophyll meter-and leaf color chart-based nitrogen

management for rice and wheat in Northwestern India. *Agron. J.* 2002, 94:821-829.

[39] Shukla A K, Ladha J K, Singh V K et al. Calibrating the leaf color chart for nitrogen management in different genotypes of rice and wheat in a system perspective. *Agron. J.* 2004. 96: 1606-1621.

[40] Giunta, F, Motzo R, Deidda M. SPAD readings and associated leaf traits in durum wheat, barley and triticale cultivars. *Euphytica*, 2002, 125: 197-205.

[41] Hussain F, Bronson K F, Singh Y et al. Use of chlorophyll meter sufficiency indices for nitrogen management of irrigated rice in Asia. *Agron. J.*, 2000, 92: 875-879.

[42] Hawkins J A, Sawyer J E, Barker D W, Lundvall J P. Using relative chlorophyll meter values to determine nitrogen application rates for corn. *Agron J.*, 2007, 99(4): 1034-1040.

[43] Varvel G E, Wilhelm W W, Shanahan J F, Schepers J S. An algorithm for corn nitrogen recommendations using a chlorophyll meter based sufficiency index. *Agron J.*, 2007, 99 (3):701-706.

[44] Boegh E, Soegaard H, Broge N et al. Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. *Rem. Sens. Environ.* 2002, 81: 179-193.

[45] Shou L, Jia L L, Cui Z L, et al. Using high-resolution satellite imaging to evaluate nitrogen status of winter wheat. *J. Plant Nutr.*, 2007, 30 (10-12):1669-1680.

[46] 赵春江, 黄文江, 王纪华, 等. 不同品种、肥水条件下小麦光谱红边参数研究[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(8): 980-987.

[47] Stone, M I, Solie J B, Raun W R, et al. Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. *Trans. ASAE* 1996, 39: 1623-1631.

[48] 宋晓宇, 王纪华, 薛绪掌, 等. 利用航空成像光谱数据研究土壤供氮量及变量施肥对冬小麦长势影响[J]. *农业工程学报*, 2004, 20 (4): 45-49.

[49] Leikam D F, Lamond R E, Mengel D B. Providing flexibility in phosphorus and potassium fertilizer recommendations. *Bett. Crops*, 2003, 87 (3): 6-10.

[50] 贾良良, 张朝春, 江荣风, 等. 国外测土施肥技术的发展与应用. *世界农业*, 2008,(5): 60-63.

[51] Tang X, Ma Y B, Hao X Y et al, Determining critical values of soil Olsen-P for maize and winter wheat from long-term experiments in China[J]. *Plant Soil*, 2009. DOI 10.1007/s11104-009-9919-y.

[52] 王兴仁, 张福锁, 曹一平, 等. 养分资源管理的理论和技术及其在小麦玉米高产轮作中的应用[J]. *中国农业大学学报*, 2003, 8 (增刊):36-41.

[53] 姜宗庆, 封超年, 黄联联, 等. 施磷量对不同类型专用小麦产量和品质的调控效应. *麦类作物学报*, 2006, 26 (5): 113-116.

[54] 王红娟. 我国北方粮食主产区土壤养分分布特征研究. 北京: 中国农业科学院博士学位论文. 2007.

[55] 刘万代, 朱云集, 谭金芳, 等. 沙薄地小麦追施硫肥的效应初报. *西南农业学报*, 2006, 19 (2): 196-199.

[56] 杨安中. 硫肥对小麦产量及品质的影响. *土壤通报*, 2000, 31 (5):236-237.

- [57] 李玉影, 刘双全. 硫对春小麦产量和品质的影响. 土壤肥料, 2004(1): 14-15.
- [58] 王东, 于振文, 王旭东. 硫肥对冬小麦硫素吸收分配和产量的影响. 作物学报, 2003, 29 (5): 791-793.
- [59] 李强. 锌对小麦生长发育及产量影响的研究. 耕作与栽培, 2003, (3): 52-53.
- [60] 李允国, 宋金锋, 周海涛, 等. 黄潮土小麦施锌效果及应用技术研究. 河南农业科学, 2006 (5): 70-71.
- [61] 涂仕华, 冯文强. 锰对小麦生长的影响及与其它元素的交互作用. 西南农业大学学报. 1999, 12(专辑): 13-20
- [62] 徐惠云, 李占成. 锌锰微肥对春小麦的增产作用. 作物杂志, 2002 (2): 38-39.
- [63] 杨宗飞. 微量元素锰对小麦产量的影响. 耕作与栽培, 2005 (3): 37-38.
- [64] Cassman K G, Dobermann A. Walters D T. Agroecosystems, nitrogen use efficiency, and nitrogen management. *Ambio*, 2002, 31: 132-140.
- [65] 王月福, 姜东, 于振文, 曹卫星. 高低土壤肥力下小麦基施和追施氮肥的利用效率和增产效应[J]. 作物学报, 2003,29(04): 491-495.
- [66] Gooding M J, Davies W P. *Wheat production and utilization*. CAB Int., Wallingford, UK. 1997.
- [67] Sonmez F. Effect of nitrogenous fertilizer on grain yield and grain protein concentration in winter wheat. *Asian J. Chem.*, 2007,19(3): 2036-2044
- [68] 徐恒永, 赵振东, 刘爱峰, 等. 氮肥对优质专用小麦产量和品质的影响Ⅱ. 氮肥对小麦品质的影响. 作物杂志, 2002, (2): 38-39.
- [69] Ottman M J, Doerge T A, Martin E C. Durum grain qualities affected by nitrogen fertilization near anthesis and irrigation during grain fill. *Agron. J.* 2000, 92, 1035-1041.
- [70] Thomason W E, Griffey C A, Phillips S B. Nitrogen and sulfur fertilization for improved bread wheat quality in humid environments. *Bett. Crops*, 2008, 92 (1): 10-11
- [71] 陆增根, 戴廷波, 姜东, 等. 不同施氮水平和基追比对弱筋小麦籽粒产量和品质的影响. 麦类作物学报, 2006, 26(6): 75-80
- [72] 李生秀. 提高旱地土壤氮肥利用效率的途径和对策. 土壤学报, 2002, 39(增刊): 56-76.
- [73] Maitlo A, Hassan Z, Shah A N, Khan H. Growth, yield and nutrient uptake of wheat (*Triticum aestivum* L.) in relation to foliar and soil application of urea[J]. *Int. J. Agric. & Biol.*, 2006, 8:477-481.
- [74] 王龙俊, 郭文善, 封超年. 小麦高产优质栽培新技术. 上海:上海科学技术出版社. 2000.
- [75] 于振文, 梁晓芳, 李延奇, 王雪. 施钾量和施钾时期对小麦氮素和钾素吸收利用的影响. 应用生态学报, 2007, 18 (1): 69-74.
- [76] 马新明, 王小纯, 王志强. 氮素形态对不同专用型小麦生育后期光合特性及穗部性状的影响. 生态学报, 23(12): 2587-2593.
- [77] Adjetey J A, Campbell L C, Searle P G E, Saffigna P. Studies on depth of placement of urea on nitrogen recovery in wheat grown on a red-brown earth in Australia. *Nutr. Cyc. in Agroecosyst.* 1999, 54: 227-232.
- [78] 魏秀梅, 左东峰. 冬小麦氮肥深浅追施对氮素利用率和磷钾吸收量的影响. 核农学通报, 1996, 17 (5): 233-235.

- [79] 曹兵, 李新慧, 张琳, 等. 冬小麦不同基肥施用方式对土壤氮挥发的影响. 华北农学报, 2001, 16 (2): 83- 86.
- [80] 巨晓棠, 张福锁. 氮肥利用率的要义及其提高的技术措施. 科技导报, 2003, (4): 51-54.
- [81] Tewari K, Sukanuma T, Fujikake H. Effect of deep placement of N fertilizers and different inoculation methods of bradyrhizobia on growth, N₂ fixation activity and N absorption rate of field-grown soybean plants. J. Agron. Crop Sci. 2004, 190(1):46-58.
- [82] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.
- [83] 孙羲. 植物营养原理. 北京: 中国农业出版社, 1995. 274-291.
- [84] Jackson G D, Kushnak G D, Carlson G R, Wichman D M. Correlation of the Olsen phosphorus test: Spring wheat response. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 1997, 28:813-822.
- [85] Jones C, Jacobsen J. Fertilizer placement and timing. MSU extension service, Nutrient Management Module No. 11. 2003.
- [86] Bordoli J M, Mallarino A P. Deep and shallow banding of phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. Agron. J. 1998, 90: 27-33.
- [87] Havlin J L, Beaton J D, Tisdale S L, Nelson W L. Soil fertility and fertilizers(6th Ed.). Upper Saddle River, N.J. Prentice-Hall, Inc. 1999.
- [88] Garnett T P, Graham R D. Distribution and remobilization of iron and copper in wheat. Ann. Bot., 2005, 95: 817-826.
- [89] 张学军, 王兴仁, 张福锁, 罗代雄. 宁夏扬黄新灌区微肥对春小麦的有效性及适宜用量的研究. 土壤肥料, 2000, 6: 32-34.
- [90] 汪洪, 刘新保, 褚天铎, 等. 锌肥对作物产量、子粒锌及土壤有效锌含量的后效. 土壤肥料, 2003, (1): 3-9.