

# 小麦玉米轮作体系氮、磷吸收与平衡研究

吕丽华,张经廷,董志强,姚艳荣,梁双波,贾秀领

(河北省农林科学院 粮油作物研究所,农业部华北地区作物栽培科学观测实验站,河北 石家庄 050035)

**摘要:**当前在作物生产中氮磷资源的不合理利用严重威胁环境,为了探讨华北山前平原冬小麦-夏玉米轮作体系合理的氮磷配合措施,在几年水氮(水磷)定位试验基础上对氮磷吸收与利用状况进行了分析。试验为小麦-玉米周年轮作种植,设水氮和水磷试验,水分为主区,施氮(磷)量为副区,裂区试验设计。水分设置限水和适水2个处理,周年设置6个施氮水平,小麦+玉米氮肥用量分别为0+0,60+60,120+120,180+180,240+240,300+300 kg/hm<sup>2</sup>;3个施磷水平,小麦季磷肥用量分别为75,150,225 kg/hm<sup>2</sup>,玉米季不施磷。结果表明,施氮(磷)可提高作物地上部分吸氮(磷)量,小麦和玉米全年施氮量240 kg/hm<sup>2</sup>即可达到较高的地上部总吸氮量,限水和适水下施氮量分别为218.7,243.5 kg/hm<sup>2</sup>才能保证氮素盈余量为零。小麦和玉米全年施磷量75~150 kg/hm<sup>2</sup>可达到较高的地上部总吸磷量,但限水和适水下施磷量分别为49.4,69.9 kg/hm<sup>2</sup>才能保证磷素盈余量为零。冬小麦对氮和磷的生产效率低于夏玉米,限水和适水下百千克籽粒吸氮量小麦分别为2.4,2.3 kg,平均为夏玉米的1.42倍;百千克籽粒吸磷量小麦均为0.61 kg,平均为夏玉米的1.23倍。当限水和适水下土壤全氮含量分别达0.102%和0.097%、全磷含量分别达0.213%和0.209%时土壤即可保持养分盈余量为零。土壤水分含量较高使植株对氮磷的吸收量也较高,但百千克籽粒吸氮(磷)量却表现出相反的趋势。在华北山前平原区小麦玉米轮作体系周年施氮量218.7~243.5 kg/hm<sup>2</sup>、施磷量49.4~69.9 kg/hm<sup>2</sup>可实现氮磷盈余量为零。

**关键词:**氮;磷;盈余(亏)量;百千克籽粒吸氮(磷)量;吸氮(磷)量

**中图分类号:**S143.1;S143.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7091(2015)04-0181-07

**doi:**10.7668/hbxb.2015.04.031

## Study on Absorption and Balance of Nitrogen, Phosphorus in Winter Wheat and Summer Maize Rotation System

LÜ Li-hua, ZHANG Jing-ting, DONG Zhi-qiang, YAO Yan-rong, LIANG Shuang-bo, JIA Xiu-ling  
(Institute of Cereal and Oil Crops, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Scientific Observing and Experimental Station of Crop Cultivation in North China, Ministry of Agriculture P. R. China, Shijiazhuang 050035, China)

**Abstract:** In the current, application of nitrogen (N) and phosphorus (P) fertilizer is unreasonable in crop production, which serious threat to the environment, in order to explore a reasonable measures in applying N and P for the winter wheat and summer maize rotation system in North China Plain, and absorption and utilization status of N and P was analyzed basing on a few years foundation location test of water and nitrogen (phosphorus). In the winter wheat and summer maize rotation system, the split plot design was employed with main plot of water (limiting water and suitable water), sub-plot of nitrogen fertilizer 0+0, 60+60, 120+120, 180+180, 240+240 and 300+300 kg/ha respectively, for wheat and maize rotation system, and sub-plot of phosphorus fertilizer 75, 150, 225 kg/ha respectively for wheat, and three replicates in each sup-plot. The main results showed that N and P absorbing amount in shoot could be increased relying on application of N and P fertilizer, but it could not continue to bring high absorption when excessive application of N and P fertilizer. When annual N application amount reached 240 kg/ha, the higher N in shoot could be achieved, and N application amount reached to 218.7, 243.5 kg/ha, which could ensure the nitrogen surplus was zero. When annual P application amount reached 75-150 kg/ha, the demand for P of wheat and maize would be met, but P application amount reached to 49.4, 69.9 kg/ha, which could ensure the P

收稿日期:2015-05-06

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划粮食丰产科技工程项目(2013BAD07B05;2011BAD16B08);河北省渤海粮仓建设项目

作者简介:吕丽华(1977-),女,河北衡水人,助理研究员,博士,主要从事小麦玉米微灌节水高产、水肥一体化技术研究。

通讯作者:贾秀领(1964-),女,河北正定人,研究员,博士,主要从事作物高产与资源高效利用研究。

梁双波(1961-),男,河北大名,研究员,主要从事作物农机农艺一体化技术研究。

surplus was zero. Compared with summer maize, the demand of nitrogen and phosphorus was higher for winter wheat, and which was 1.42, 1.23 times respectively. 100 kg grain nutrient uptake of wheat were 2.4, 2.3 kg for N, and 0.61 kg for P under limiting water and suitable under water. When total nitrogen content were up to 0.102% and 0.097% respectively, and the total phosphorus content were 0.213% and 0.209% respectively under the condition of limited water and suitable water, and the overmeasure of N and P was zero. N and P in shoot were higher when soil moisture content was higher, but absorptive N and P amount per hundred kilograms grain that showed the opposite trend, it explained that better moisture condition can promote the absorption of N and P in plant, but the rate of nutrient uptake rate which was less than the yield increase. For winter wheat and summer maize rotation system, N and P balance would be achieved when N application rates was 218.7 - 243.5 kg/ha, and P application rates was above 49.4 - 69.9 kg/ha, respectively.

**Key words:** N; P; Overmeasure (defucuebcy); Absorptive N (P) amount per 100 kg grain; N (P) in shoot

氮和磷是农业生产中最重要的养分限制因子,也是重要的环境污染因素<sup>[1-8]</sup>。养分不平衡管理引起的土壤氮磷素盈余已经不单单是农学问题而是被看作一个重要的环境问题<sup>[9]</sup>。华北山前平原是农业生产的高产区,小麦-玉米轮作是该区主要的粮食种植制度,为了追求高产过多施用氮磷肥的现象较为普遍。因此,利用长期肥料试验研究氮磷素养分平衡状况对于评价施肥制度的合理性及预测土壤肥力的发展趋势均具有重要的意义。

当前,中国农田生态系统中氮素大体上处于盈余状态,且呈现持续增长趋势<sup>[11]</sup>,在华北地区氮肥平均年用量为 550 kg/hm<sup>2</sup><sup>[10]</sup>,但钟茜等<sup>[11]</sup>研究表明,华北地区冬小麦和夏玉米轮作体系达到最高产量的施氮量分别是 112, 180 kg/hm<sup>2</sup>。作物对磷肥的利用率也很低,一般只有 5% ~ 25%<sup>[12-13]</sup>。因此,大部分磷肥作为无效态的磷积累在土壤中<sup>[14-15]</sup>,从而导致土壤中磷加速累积,超过作物需要的水平,这时继续施磷作物产量将不再显著提高<sup>[16-17]</sup>。毫无疑问,肥料对提高土壤肥力、增加土地生产力至关重要,但多高的施氮(磷)量能维持养分平衡,这需要从总体上对小麦玉米生产中投入、产出的氮磷状况进行评价。

已有养分吸收与养分平衡方面的研究多集中于氮肥上,而关于不同施磷量对磷素吸收与磷素平衡方面的研究较少,而且对于作物而言,合理的水肥配比一般需要综合考虑区域土壤特征、供水状况等因素。通过研究定位试验作物氮磷吸收和氮磷盈余状况、氮磷素盈亏与土壤全氮、全磷的消长关系,明确当前施肥水平下氮磷平衡状况,为氮磷素资源的持续利用和氮磷肥的合理施用提供技术指导。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验时间、地点

试验于 2007 - 2011 年在河北省农林科学院粮

油作物研究所藁城堤上试验站进行,该区属华北地区太行山山前平原区(东经 116°85', 北纬 38°41')。试验地 0 ~ 20 cm 土壤含有机质 15.5 g/kg,全氮 0.97 g/kg,碱解氮 72.7 mg/kg,有效磷 19.5 mg/kg,有效钾 91.0 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验为冬小麦-夏玉米周年轮作种植,设置水氮和水磷试验,裂区试验设计,水分为主区,面积 4.8 m × 70.8 m,施肥量为副区,面积 4.8 m × 10.8 m,3 次重复。水分设置限水和适水 2 个处理,冬小麦足墒播种,限水和适水下灌水次数分别为 1 水(拔节期)和 2 水(拔节 + 开花水),夏玉米限水和适水下灌水次数根据降水量调节(1 水为播前水,2 水为播前水 + 大口水,3 水为播前水 + 大口水 + 开花水),5 年的灌水次数和灌水量见表 1,小区间设置 1 m 隔离区。设置 6 个施氮水平,小麦、玉米氮肥用量分别为 0 + 0, 60 + 60, 120 + 120, 180 + 180, 240 + 240, 300 + 300 kg/hm<sup>2</sup>,冬小麦季氮肥的 50% 作基肥,50% 在拔节期撒施后灌水,磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%) 150 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥(K<sub>2</sub>O 50%) 105 kg/hm<sup>2</sup> 做基肥 1 次施入。小麦品种 2007 - 2008 年采用石麦 15, 2009 - 2011 年采用衡 4399。设定基本苗 375 万/hm<sup>2</sup>,冬小麦于 10 月 6 - 14 日播种,6 月 8 - 15 日收获。冬小麦收获后,免耕播种夏玉米,氮肥于 10 ~ 12 叶期在降水或灌水前撒施,玉米品种采用郑单 958。设定密度 6.75 万株/hm<sup>2</sup>,株距 25 cm,行距 60 cm,于 6 月 12 - 20 日播种,9 月 26 日 - 10 月 4 日收获。冬小麦和夏玉米季秸秆全部还田。自 2010 年开始增设水磷试验,小麦季设置 3 个施磷水平,磷肥用量分别为 75, 150, 225 kg/hm<sup>2</sup>,玉米季不再施磷;不同施磷量处理小麦 + 玉米氮肥用量 240 + 240 kg/hm<sup>2</sup>,小区面积、重复数和其他田间管理措施同水氮试验。

表 1 2007–2011 年小麦和玉米生育期间供水量

Tab. 1 Water supply of wheat and maize in 2007–2011

mm

年份 Year	降水量 Precipitation	小麦 Wheat				玉米 Maize				
		灌水量/灌水次数 Irrigation rate/Time		供水量 Water supply		灌水量/灌水次数 Irrigation rate/Time		供水量 Water supply		
		限水 Limited	适水 Suitable	限水 Limited	适水 Suitable	限水 Limited	适水 Suitable	限水 Limited	适水 Suitable	
2007	125.4	67.5	135.0	192.9	260.4	267.4	75.0	152.1	342.4	419.5
2008	142.5	68.3	137.3	210.8	279.8	408.5	0.0	62.4	408.5	470.9
2009	92.6	43.3	110.8	135.9	203.4	483.3	139.5	200.2	622.8	683.5
2010	89.9	76.3	145.8	166.2	235.7	234.9	75.0	225.0	309.9	459.9
2011	68.3	121.2	193.7	189.5	262.0	420.5	75.0	142.5	495.5	563.0

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物重 选择有代表性的植株,夏玉米每区取 4 株,冬小麦每区取样 0.5 m 双行,将籽粒、秸秆分别装袋,于 105 °C 下杀青 30 min,然后在 80 °C 下烘干至恒重,粉碎。

1.3.2 产量 采用小区联合收割机收获小麦,脱粒,风干后称重,折算为 13% 含水量的标准产量。每小区收获玉米 18 m<sup>2</sup>,称取所有果穗鲜质量,按平均鲜穗质量从果穗中随机选取 20 穗,脱粒,风干后称重,折算为 14% 含水量的标准产量。

1.3.3 土壤和植株全氮含量测定 采用半微量凯氏定氮法。

1.3.4 土壤和植株全磷含量测定 采用钼锑抗法测定。用钒钼黄比色法<sup>[18]</sup>测定植株含磷量,计算各器官磷素积累量及植株磷素积累总量(以 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计)。

1.3.5 地上部植株氮或磷素积累量(kg/hm<sup>2</sup>) = 植株各器官含氮或磷量与该器官干物重的乘积之和。

1.3.6 100 kg 籽粒吸氮(磷)量 = 植株总吸氮(磷)量/籽粒产量 × 100。

1.3.7 氮(磷)素盈(亏)量(kg/hm<sup>2</sup>) = 施氮(磷)

量 - 籽粒总吸氮(磷)量。

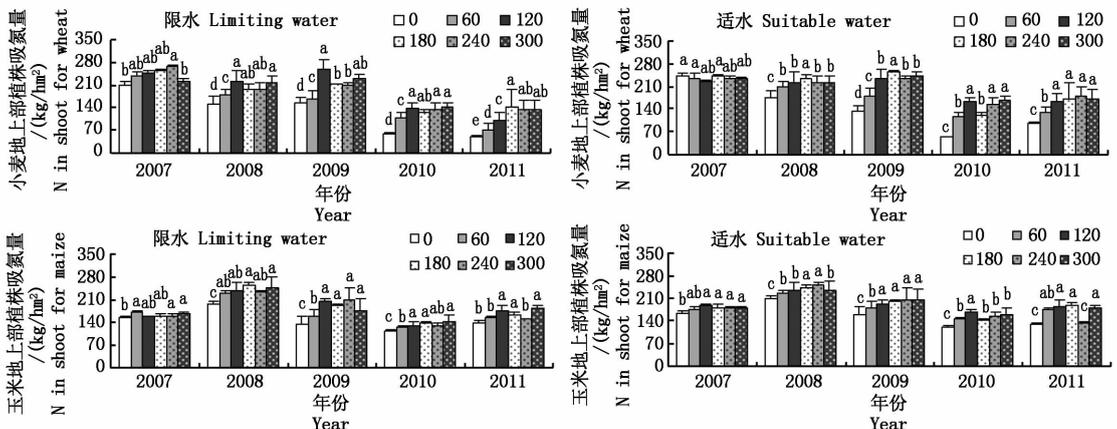
### 1.4 数据分析

数据采用 Microsoft Excel 2003 进行相关性分析,用 SAS 13.0 软件进行方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮素和磷素吸收

2.1.1 地上部总吸氮和吸磷量 施氮促进作物对氮素的吸收,提高作物地上部分吸氮量(图 1),5 年平均限水和适水下冬小麦施氮量增至 120 kg/hm<sup>2</sup> 地上部吸氮量达到高值,显著高于低氮和 N0 处理,再增加施肥量地上部植株吸氮量增加不显著。2008,2009 年限水下施氮量 120 kg/hm<sup>2</sup>、适水下 180 kg/hm<sup>2</sup> 处理吸氮量较高,较不施氮和低氮处理分别高 46.3% 和 39.7%。2010 年限水和适水下施氮量 120 kg/hm<sup>2</sup> 处理吸氮量达到高值,较不施氮和低氮处理分别高 63.7% 和 91.7%。2011 年限水下施氮量 180 kg/hm<sup>2</sup> 吸氮量较高,较不施氮和低氮处理高 92.7%,而适水下 120~300 kg/hm<sup>2</sup> 各施氮处理吸氮量差异未达显著水平,较不施氮和低氮处理高 29.6%。



每一年不同处理标以不同字母的数据在 0.05 水平差异显著 ( $n=4$ )。图 2~5 同。

In each year, values followed by a different letter in different treatments are significantly different at 0.05 probability level ( $n=4$ ). The same as Fig. 2–5.

图 1 小麦和玉米地上部植株吸氮量对水氮的响应

Fig. 1 Effect of water and nitrogen on N in shoot for wheat and maize

限水和适水条件下夏玉米地上部吸氮量随施肥量增加先升后持平,2009,2010,2011年限水和适水下施氮量 120 kg/hm<sup>2</sup> 地上部总吸氮量达到较高值,再增加施氮量,地上部氮素积累量增加甚微,限水和适水下较不施氮和低氮处理分别高 10.1% 和 15.1%;2008年限水和适水下 180 kg/hm<sup>2</sup> 地上部总吸氮量达到较高值,较不施氮和低氮处理分别高 8.6% 和 15.8%。

对于冬小麦,施磷促进作物对磷素的吸收,可提高作物地上部分吸磷量(图 2),2 年平均限水下施磷量 150 kg/hm<sup>2</sup>、适水下施磷量 75 kg/hm<sup>2</sup> 地上部

总吸磷量达到较高值,再增加施磷量地上部植株总吸磷量不增加或增加不显著,限水和适水下吸磷量较高处理较其他处理分别高 14.1% 和 5.2%。

对于夏玉米,限水下地上部总吸磷量随施磷量增加而增加,2 年平均施磷量 225 kg/hm<sup>2</sup> 地上部总吸磷量显著较高,较其他处理高 11.0%。适水下 2 年变化趋势不一致,2010 年施磷量 75 kg/hm<sup>2</sup> 处理地上部吸磷量较高,但处理间差异不显著,2011 年则为施磷量 225 kg/hm<sup>2</sup> 处理地上部吸磷量显著较高,较其他处理高 11.4%。

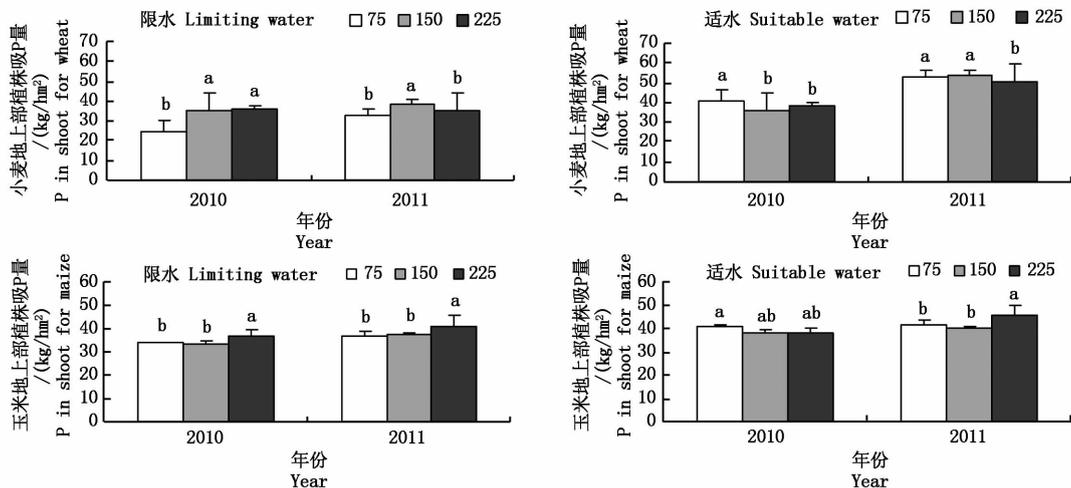


图 2 小麦和玉米地上部植株吸磷量受水氮的影响

Fig. 2 Effect of water and phosphorus on P in shoot for wheat and maize

2.1.2 百千克籽粒吸氮和吸磷量 百千克养分吸收量是衡量养分生产效率的一个重要参数,一般百千克养分吸收量越低,养分生产率越高。百千克籽粒吸氮量随施氮量增加先升后持平(图 3),冬小麦和夏玉米 5 年平均限水和适水下施氮量 120 kg/hm<sup>2</sup> 或 180 kg/hm<sup>2</sup> 处理百千克籽粒吸氮量达到较高值,再增加施氮量,养分吸收量增加甚微。说明,在轮作

体系中小麦和玉米施氮量均达到 120 ~ 180 kg/hm<sup>2</sup> 氮素生产效率表现出降低趋势。冬小麦百千克籽粒需氮量明显高于夏玉米,为夏玉米的 1.42 倍。说明,冬小麦养分生产效率低于夏玉米。对于冬小麦,不同施氮处理百千克籽粒吸氮量限水下为 2.2 ~ 2.6 kg,平均为 2.4 kg,适水下为 2.0 ~ 2.4 kg,平均为 2.3 kg。限水下当施氮量增加到 120 kg/hm<sup>2</sup> 时

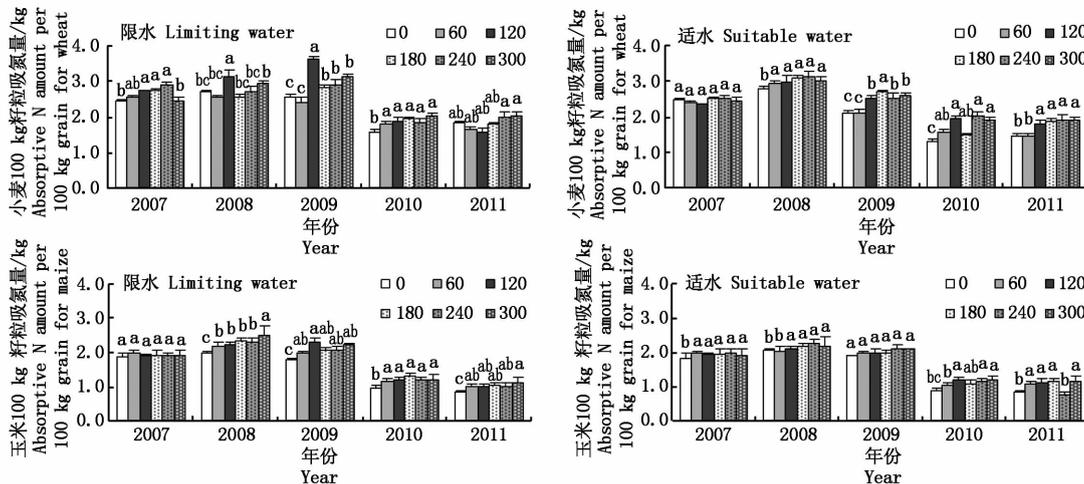


图 3 小麦和玉米百千克籽粒吸氮量受水氮的影响

Fig. 3 Effect of water and nitrogen on absorptive N amount for wheat and maize

5 年平均百千克籽粒吸氮量达到最高值 2.6 kg, 而适水条件下施氮量增至 180 kg/hm<sup>2</sup> 百千克籽粒吸氮量达到高值 2.4 kg, 但施氮处理间差异未达显著水平。对于夏玉米, 不同施氮处理百千克籽粒吸氮量限水下为 1.5 ~ 1.8 kg, 平均为 1.7 kg, 适水下为 1.5 ~ 1.7 kg, 平均为 1.6 kg。限水下当施氮量增加到 120 kg/hm<sup>2</sup> 时百千克籽粒吸氮量达到 1.7 kg, 再增加施氮量时吸氮量继续增加, 但处理间差别未达显著水平; 适水下施氮量增加至该值时百千克籽粒吸氮量达到最高值 1.7 kg。

由图 4 可见, 对于冬小麦, 不同施磷处理百千克籽粒吸磷量限水下为 0.54 ~ 0.64 kg, 适水下为

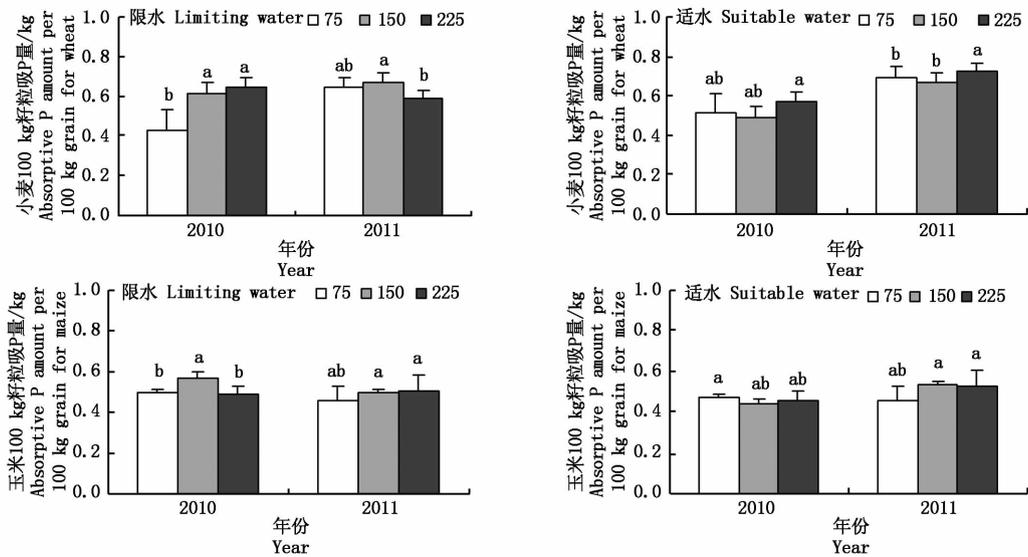


图 4 小麦和玉米百千克籽粒吸磷量受水氮的影响

Fig. 4 Effect of water and phosphorus on absorptive P amount for wheat and maize

## 2.2 氮、磷平衡分析

2.2.1 氮、磷素盈余(亏)量 由图 5 可见, 氮盈余(亏)量与施氮量有关, 随施氮量增加氮盈余量显著增加。限水和适水下趋势基本一致, 2007 - 2009 年全年施氮量达 360 kg/hm<sup>2</sup> 时表现出氮盈余, 该施氮量下氮盈余量平均为 84.1 kg/hm<sup>2</sup>。2010 - 2011 年全年施氮量达 240 kg/hm<sup>2</sup> 时表现出氮盈余, 该施氮量下氮素盈余量平均为 58.6 kg/hm<sup>2</sup>。对施氮量(x)和氮素盈余量(y)的关系进行了模拟, 结果显示限水和适水下可分别用公式  $y = 0.9157x - 200.25$  ( $R^2 = 0.938^{**}$ ) 和  $y = 0.9075x - 220.98$  ( $R^2 = 0.9477^{**}$ ) 表示, 说明当氮素盈余量为零时, 限水和适水下施氮量分别为 218.7, 243.5 kg。

由图 5 可见, 磷盈余(亏)量与施磷量有关, 随施磷量增加磷盈余量显著增加。限水条件下磷素皆有盈余, 施磷量 75, 150, 225 kg/hm<sup>2</sup> 时磷盈余量 2 年平均分别为 25.5, 92.0, 166.9 kg/hm<sup>2</sup>, 占作物收获带走的 0.5, 1.6, 2.9 倍; 但 2011 年较 2010 年磷

0.58 ~ 0.64 kg, 平均为 0.61 kg。增加施磷量明显提高了百千克籽粒的吸磷量, 2 年平均限水下施磷量增加到 150 kg/hm<sup>2</sup>、适水下增加到 225 kg/hm<sup>2</sup> 时百千克籽粒吸磷量达到较高值, 分别较施磷量较低处理高 4.6% 和 15.4%。对于夏玉米, 不同施磷处理百千克籽粒吸磷量限水下为 0.48 ~ 0.53 kg, 平均为 0.51 kg, 适水下为 0.46 ~ 0.49 kg, 平均为 0.48 kg; 限水和适水下 2 年平均施磷量 150 kg/hm<sup>2</sup> 处理达到较高值, 再增加施磷量吸磷量降低或增加不明显。说明, 小麦和玉米全年施磷量超过 150 kg/hm<sup>2</sup> 磷素生产效率表现出降低趋势。冬小麦百千克籽粒需磷量明显高于夏玉米, 是夏玉米的 1.23 倍。

素盈余量降低, 3 个施磷处理分别降低了 36.7%, 9.5%, 3.9%。适水条件下 2010 年磷素皆有盈余, 2011 年施磷量 75 kg/hm<sup>2</sup> 处理磷素表现出亏缺, 亏缺量 13.2 kg/hm<sup>2</sup>, 其他 2 个处理表现盈余, 盈余量 2 年平均分别为 82.1, 153.8 kg/hm<sup>2</sup>; 适水下同样表现出 2011 年较上年磷盈余量降低的趋势。对施磷量和磷素盈余量的关系进行了模拟, 结果显示, 限水和适水下可分别用公式  $y = 0.9426x - 46.557$  ( $R^2 = 0.9924^{**}$ ) 和  $y = 0.9981x - 69.726$  ( $R^2 = 0.9784^{**}$ ) 表示, 说明当磷素盈余量为零时, 限水和适水下施磷量分别为 49.4, 69.9 kg。

### 2.2.2 全氮和全磷对氮、磷素盈余(亏)的响应

由图 6 可见, 随氮素盈余量增加土壤全氮含量也呈线性增加, 限水和适水下二者相关系数分别为 0.619<sup>\*\*</sup> 和 0.733<sup>\*\*</sup> ( $P < 0.01$ )。当氮素盈余量为零时, 土壤全氮含量在限水和适水下分别为 0.102% 和 0.097%。

随磷素盈余量增加土壤全磷含量也呈线性增加

(图 7),限水和适水下二者相关系数分别为 0.720\*\* 和 0.962\*\* ( $P < 0.01$ )。当磷素盈余量为零时土壤

全磷含量在限水和适水下分别为 0.213% 和 0.209%。

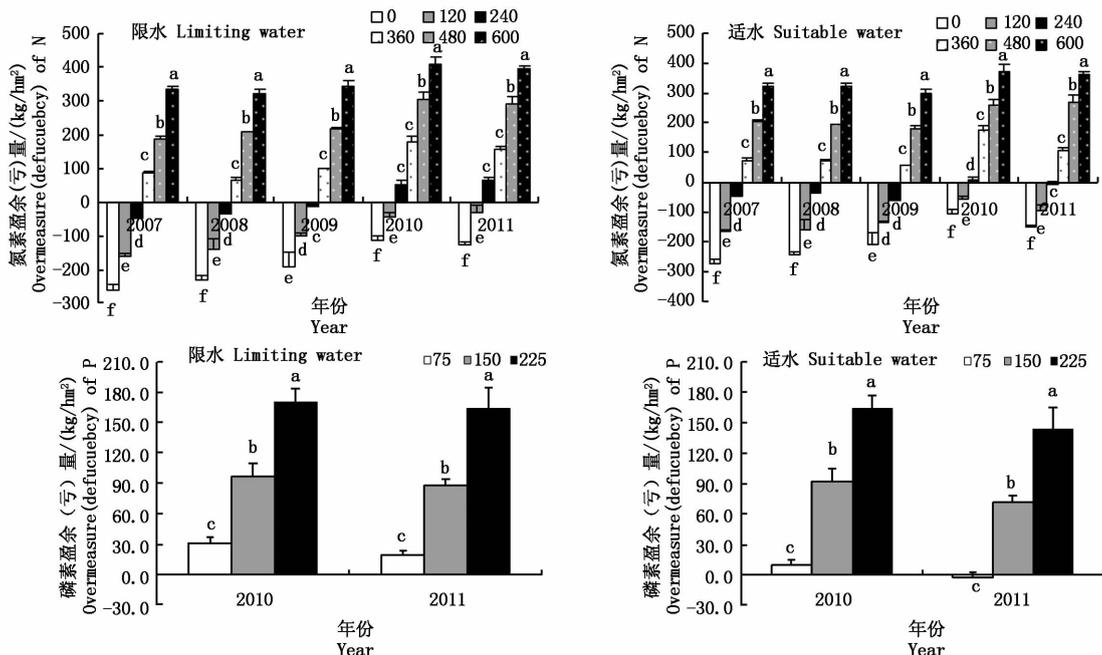


图 5 小麦和玉米氮磷盈余(亏)量受水氮(磷)的影响

Fig. 5 Effect of water and nitrogen (phosphorus) on overmeasure (defucueby) of N (P) for wheat and maize

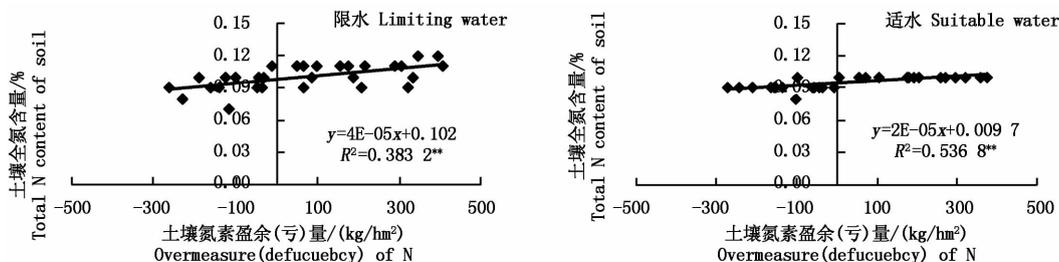


图 6 氮素盈余(亏)和全氮消长的关系

Fig. 6 Correlation relationship between overmeasure (defucueby) of N and changes of soil total N

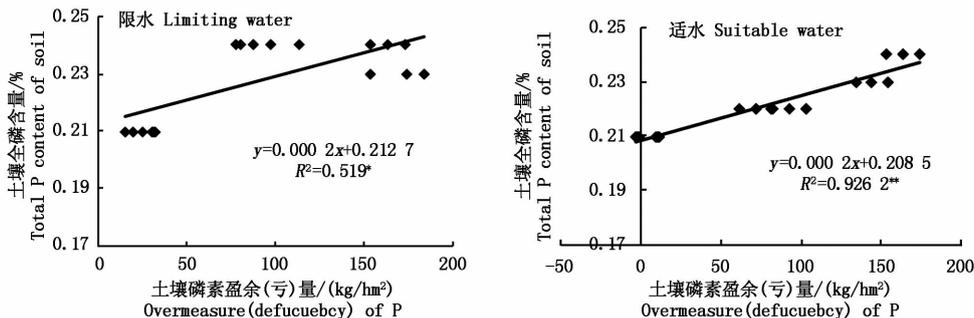


图 7 磷素盈余量和有效磷消长的关系

Fig. 7 Correlation relationship between overmeasure (defucueby) of P and changes of soil total P

### 3 讨论与结论

当农田氮盈余量超过作物需要量的 20% 时,可造成环境危害,且增加农田氮素的流失量<sup>[19]</sup>。巨晓棠等<sup>[20]</sup>研究表明,北京地区小麦玉米轮作体系每季施氮量 120 kg/hm<sup>2</sup> 较适宜,而崔振岭等<sup>[5]</sup>对华北小麦玉米轮作体系研究表明,在土壤无机氮含量较高

时,小麦季施用 150 kg/hm<sup>2</sup> 就可满足小麦玉米两季作物的氮素需求。但本研究表明,在华北山前平原中等偏上地力水平下小麦和玉米全年施氮量 240 kg/hm<sup>2</sup> 可达到较高的地上部总吸氮量,经模拟显示限水和适水下施氮量分别达 218.7,243.5 kg/hm<sup>2</sup> 可保证氮素盈余量为零。可见,本研究得出的适宜施氮量与崔振岭等研究结果相差较多,一方面与开

展试验的基础地力有关,另一方面与盈余(亏)量的计算方法有关。

磷素的盈余可导致土壤磷素的积累,从而增加农田土壤磷素的流失<sup>[21]</sup>,而适量盈余可以提高土壤肥力,有助于扩大贫磷土壤有效磷库,提高土壤的供磷力<sup>[22-23]</sup>。姜宗庆等<sup>[24]</sup>研究了在缺磷土壤上施磷量不适宜超过 180 kg/hm<sup>2</sup>,当施磷量超过该值时,植株对磷的吸收量呈下降趋势;对于磷素含量较高的土壤则倡导磷肥用量与作物移出磷量大抵相当,以保持土壤磷素稳定在一定水平。因此,在各地建立适宜的施肥制度,不但要补充土壤养分以实现作物的增产效果,而且需将养分盈余量保持在合理的范围内。本研究土壤有效磷含量属于中等水平,在该地力条件下小麦和玉米限水和适水下全年施磷量分别达 49.4,69.9 kg/hm<sup>2</sup> 即可实现磷素盈余量为零,但为了提高土壤的供磷力,磷素应该适度盈余,因此施磷量应大于该值。

施氮(磷)可提高作物地上部分吸氮(磷)量,小麦和玉米全年施氮量 240 kg/hm<sup>2</sup> 即可达到较高的地上部总吸氮量,限水和适水下施氮量分别达 218.7,243.5 kg/hm<sup>2</sup> 即能保证氮素盈余量为零;限水和适水下百千克籽粒吸氮量小麦分别为 2.4,2.3 kg,玉米为 1.7,1.6 kg;氮素盈余量为零时土壤全氮含量在限水和适水下分别为 0.102%,0.097%。小麦和玉米全年施磷量 75~150 kg/hm<sup>2</sup> 即可达到较高的地上部总吸磷量,限水和适水下施磷量分别达 49.4,69.9 kg/hm<sup>2</sup> 即可保证磷素盈余量为零;限水和适水条件下百千克籽粒吸磷量小麦均为 0.61 kg,玉米分别为 0.51,0.48 kg;当磷素盈余量为零时,土壤全磷含量在限水和适水下分别为 0.213%和 0.209%。在华北山前平原冬小麦夏玉米轮作体系周年施氮量 218.7~243.5 kg/hm<sup>2</sup>、施磷量 49.4~69.9 kg/hm<sup>2</sup> 即可实现氮磷盈余量为零。

#### 参考文献:

[1] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China-contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2/3): 117-127.

[2] 刘芬,同延安,王小英,等.渭北旱塬春玉米施肥效果及肥料利用效率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1): 48-55.

[3] 李志坚,林治安,赵秉强,等.增效磷肥对冬小麦产量和磷素利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(6): 1329-1336.

[4] Suprayogo D M, van Noordwijk K H, Cadisch C. The inherent safety net of Ultisols: Measuring and modeling retarded leaching mineral nitrogen[J]. *European Journal of Soil Science*, 2002, 53: 185-194.

[5] 崔振岭,陈新平,张福锁,等.华北平原冬小麦/夏玉米

轮作体系土壤硝态氮的适宜含量[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(10): 2227-2232.

- [6] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等.中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [7] Mallarino A P, Atia A M. Correlation of a resin membrane soil Phosphorus test with corn yield and routine soil tests [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(1): 266-272.
- [8] McDowell R W, Sharpley A N. Variation of phosphorus leached from pennsylvanian soils amended with manures, composts or inorganic fertilizer [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2004, 102(1): 17-27.
- [9] Delgado A, Scalenghe R. Aspects of phosphorus transfer from soils in Europe [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(4): 552-575.
- [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,2006:27-41.
- [11] 钟茜,巨晓棠,张福锁.华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系对氮素环境承受力分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(3): 285-293.
- [12] 孙慧敏,于振文,颜红,等.不同土壤肥力条件下施磷量对小麦产量、品质和磷肥利用率的影响[J]. *山东农业科学*, 2006(3): 45-47.
- [13] 鲁如坤,时正元,顾益初.土壤积累态磷研究 II. 磷肥的表观积累利用率[J]. *土壤*, 1995, 27(6): 286-289.
- [14] Saleque M A, Abedin M J, Bhuiyan N I, et al. Long-term effects of inorganic and organic fertilizer sources on yield and nutrient accumulation of lowland rice [J]. *Field Crops Research*, 2004, 86(1): 53-65.
- [15] Kuo S, Huang B, Bembek R. Effects of long-term phosphorus fertilization and winter cover cropping on soil phosphorus transformations in less weathered soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41(2): 116-123.
- [16] Selles F, Campbell C A, Zentner P R. Effect of cropping and fertilization on plant and soil-phosphorus [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59: 140-44.
- [17] 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(4): 417-427.
- [18] 中国土壤学会农业化学专业委员会.土壤农业化学常规分析方法[M].北京:科学出版社,1983:276-277.
- [19] 王建国,王德禄,王守宇,等.黑龙江农田养分平衡和养分水平的动态变化[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2000, 16(2): 124-127.
- [20] 巨晓棠,刘学军,张福锁.冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(11): 1361-1368.
- [21] 章明奎.农业系统中氮磷的最佳管理实践[M].北京:中国农业出版社,2005:11-37.
- [22] 张淑茗,周景明,张增俭.磷肥在冬小麦、夏玉米轮作中的合理分配[J]. *土壤肥料*, 1995, 1(1): 26-29.
- [23] 关焱,宇万太,李建东.长期施肥对土壤养分库的影响[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(6): 131-137.
- [24] 姜宗庆,封超年,黄联联,等.施磷量对小麦物质生产及吸磷特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(5): 628-634.