

施磷量对旱地小麦氮磷钾和干物质 积累及产量的影响

王荣辉^{1,2}, 王朝辉¹, 李生秀¹, 王西娜¹, 李 华¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 广东省农业科学院土壤肥料研究所, 广东 广州 510640)

摘 要: 针对目前农业生产中存在的施肥增产效应下降问题, 研究了磷肥用量对冬小麦养分、氮磷钾和干物质积累及产量的影响, 以期高产高效施肥提供依据。在黄土高原旱地进行田间试验, 设不施磷, 施磷 P_2O_5 50 kg/hm² (不足)、 P_2O_5 100 kg/hm² (适量) 和 P_2O_5 150 kg/hm² (高量) 4 个水平, 在不同生长期采样测定冬小麦植株生物量、水分及氮磷钾养分含量。结果表明, 生物量提高是适量施磷冬小麦籽粒产量增加的主要原因; 适量施磷和高量施磷时, 生长后期的水分损失分别为植株最大累积量的 82% 和 86%、氮素损失占 26% 和 34%、磷素占 2% 和 13%、钾素占 56% 和 60%。可见, 高量施磷使生长后期作物的生物量、水分、氮磷钾养分损失增加, 从而导致了冬小麦产量降低, 施肥增产效应降低。

关键词: 施磷量; 冬小麦; 产量; 水分; 氮; 磷; 钾

中图分类号: S512.106; S143.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7601(2011)01-0115-07

近年来, 在农业生产上由于过量施肥, 出现的粮食作物不增产, 甚至减产的现象, 日益引起人们的重视。由于作物产量对氮肥的敏感性^[1], 以及过量施氮所引起的环境效应^[2~4], 人们对合理施氮的研究较多^[5]。由于磷的当季利用率很低, 残留在土壤中的肥料磷既不能挥发, 又不易淋失^[6], 所以对磷的研究, 特别是过量施用磷肥对作物生长与产量形成的影响一直报道较少。磷素是作物生长的必需营养元素, 对于作物体内糖、脂肪代谢, 含氮化合物及酶的生成, 增强作物抗旱、抗寒性有重要作用^[7]。黄土高原南部旱地塬区土壤总磷含量并不低, 但有效磷含量较低, 至少有 70% ~ 90% 的磷进入土壤, 与土壤中大量游离碳酸钙结合, 生成难溶性的磷酸钙盐, 使作物难于吸收^[8]。磷和氮一样, 也不能过量施用。姜宗庆试验表明^[9], 施磷量 (P_2O_5) 在 0 ~ 180 kg/hm² 范围内, 植株对磷的吸收随施磷量增加而上升; 当施磷量超过 108 kg/hm² 时, 叶面积指数 (LAI)、植株茎蘖数、茎蘖成穗率、花后干物质积累呈下降趋势, 籽粒产量也随之下降。张岁岐等研究发现^[10], 磷营养明显增加了束缚水含量, 降低了其对干旱的敏感性, 改善了植株的水分状况。孙慧敏等试验表明^[11], 施磷为 75 和 105 kg/hm² 时, 小麦籽粒产量无明显差异, 但随施磷量增加, 氮素效率显著降低。张静

等^[12]通过对玉米低、高两个磷水平的试验证明, 施磷有促进玉米钾素吸收的作用。可见, 目前研究中, 人们已经注意到施磷对作物产量、水分和养分利用的影响, 但没有把施磷引起小麦生物量、水分、养分的动态变化联系起来, 从作物生长的动态过程揭示施磷引起作物减产的原因。本研究通过田间试验, 研究冬小麦的生物量、水分、养分吸收的动态变化, 寻找施磷量与冬小麦产量形成的关系。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于西北农林科技大学农作一站, 渭河三级阶地。当地年平均气温 13℃, 降雨量 550 mm 左右, 主要集中在 7 ~ 9 月, 小麦生长季节降水占全年总量的 49%。属半湿润易旱地区。供试土壤 (0 ~ 20 cm) 基本理化性状为: 容重 1.24 g/cm³, pH 8.25, 有机质 13.79 g/kg, 全氮 1.07 g/kg, 硝态氮 5.43 mg/kg, 铵态氮 2.41 mg/kg, 有效磷 (Olsen - P) 15.0 mg/kg, 速效钾 182.4 mg/kg。

1.2 试验设计与管理

试验于 2004 年 10 月 5 日至 2005 年 6 月 3 日进行。设置 4 个施磷量 (P_2O_5) 处理: 0 kg/hm² (对照)、50 kg/hm² (不足)、100 kg/hm² (适量) 和 150 kg/hm²

收稿日期: 2009-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30871596); 现代农业产业技术体系建设专项; 西北农林科技大学“创新团队建设计划”

作者简介: 王荣辉 (1981—) 男, 陕西岐山人, 硕士研究生, 研究方向为养分管理与农产品品质。E-mail: w-r-h@163.com。

通讯作者: 王朝辉 (1968—) 男, 河北元氏人, 教授, 博士生导师, 研究方向为养分管理与农产品品质。E-mail: w-zhaohui@263.net。

(高量),各处理均施氮(N)160 kg/hm²。氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙。所有肥料均在播前撒施并与0~20 cm的表层土壤混匀施入。于2004年10月5日播种,供试小麦品种为小偃22,小区面积为4 m×10 m。重复4次,沿小区长边成行,行距20 cm,播种量135 kg/hm²,播深5 cm。小麦生长期,采用常规管理。

1.3 样品采集与测定

从出苗后第149天(2005年3月10日,表1)开

始,每隔10 d左右按行在每小区采集1 m长小麦作为一个样品。按生长期不同,植株样品分为茎叶、穗、籽粒与颖壳,分别称量鲜重,然后取出部分样品在105℃杀青0.5 h,75℃烘干,测干重,计算水分含量。干样品粉碎后,用H₂SO₄-H₂O₂法消煮,分别用凯氏定氮法测定全氮,钼锑钒比色法测定全磷,原子吸收法测定全钾。

表 1 采样时间与冬小麦生长期
Table 1 Sampling dates and growth stages of winter wheat

项目 Items	返青 Reviving		拔节 Jointing		抽穗 Heading		开花 Flowering	乳熟 Milking	蜡熟 Wax-ripening
日期(M-d) Date	02-14		03-26		04-26		05-05	05-25	06-05
采样(M-d) Sampling	03-10	03-20	03-30	04-10	04-20	04-30	05-10	05-20	06-03
出苗后天数(d) Days after emergence	149	159	169	180	190	200	210	220	234
生长期 Grow stage	返青中期 Middle of reviving	拔节前期 Start of Jointing	拔节初期 Beginning of jointing	拔节中期 Middle of jointing	抽穗前期 Start of heading	抽穗期 Heading	灌浆初期 Start of grain-filling	灌浆中期 Middle of grain-filling	收获期 Harvest

1.4 数据处理

用模型 $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ 对不同生育时期的生物量、水分与氮磷钾累积量与出苗后天数进行拟合,计算生物量、水分与养分累积最大速率、最高累积量及其出现时间,分析磷肥用量对生物量、水分与氮磷钾累积、产量形成的影响。

2 结果与分析

2.1 磷肥用量对收获期冬小麦生物量、籽粒产量与养分含量的影响

磷对小麦收获期生物量和产量的影响因施磷量而异(表2)。与不施磷相比,施磷100 kg/hm²时小麦生物量与籽粒产量显著提高,分别高出24%和

22%;施磷50和150 kg/hm²时,生物量和籽粒产量增加不显著。由于不同施磷量时小麦的收获指数并无明显差异(表2),说明适量施磷有助于小麦产量的增加,但籽粒产量的增加并不是由于干物质向籽粒的转移和分配增加,而是由于适量施磷可以使小麦的生物量提高。过多施磷反而使小麦生长受抑制,收获期生物量和籽粒产量有减少趋势。

但是,施磷100 kg/hm²时小麦籽粒含氮量显著降低,比不施磷低9%;施磷50和150 kg/hm²时,小麦籽粒含氮量与不施磷无明显差异。小麦籽粒的磷、钾含量虽有随施磷量增加而提高的趋势,但不同施磷量间差异不明显。

表 2 不同施磷量对冬小麦收获期生物量、籽粒产量和养分含量的影响
Table 2 Effects of phosphorus rates on biomass and nutrient contents in grain of winter wheat at harvest

施磷量 P rates (kg/hm ²)	生物量 Biomass (kg/hm ²)	籽粒产量 Grain yield (kg/hm ²)	收获指数 Harvest index (%)	籽粒收获时氮磷钾含量(%) N、P、K contents in grain		
				氮 N	磷 P	钾 K
0	10480b	4619b	44.1a	2.14a	0.61a	0.20a
50	11929ab	5195ab	43.6a	2.13a	0.65a	0.21a
100	12992a	5616a	43.2a	1.94b	0.65a	0.20a
150	12586ab	5451ab	43.3a	2.11a	0.67a	0.21a

注:同一栏数据后不同字母表示在0.05水平上差异显著。
Note: Values followed by the same lowercase letters mean significant difference at 0.05 level.

2.2 磷肥用量对小麦生物量累积的影响

冬小麦返青后生物量随生长期进程而逐渐增加,增加速度因生长期与施磷量而异(图 1)。返青期,植株生长缓慢,不同施磷量之间生物量无明显的差异。进入拔节期后,植株生长迅速,不同磷肥用量冬小麦的生物量逐渐表现出明显的差异。采用一元三次曲线方程对生物量随时间的变化进行拟合发现,生物量增长速度随施磷量增加而增大(表 3),施磷 50、100、150 kg/hm² 时,生物量累积的最大速率分别为 447、486 和 536 kg/(hm²·d),不施磷时仅为 356 kg/(hm²·d),前者比后者分别高出 25%、35% 和 49%。无论施磷与否,最大生物量均出现在灌浆中期(出苗后 222~223 d),但施磷小麦的最大生物量分别为 18 471、20 778 和 21 415 kg/hm²,比不施磷高出 15%、29% 和 33%。说明施磷可促进冬小麦营养生长旺期和生殖生长期的植株发育。

从灌浆中期至收获(出苗后 234 d,图 1,表 3),冬小麦生物量又迅速下降。与最大生物量相比,不施磷和施磷 50、100、150 kg/hm² 时,收获期生物量分

别减少 4 677、6 079、6 832 和 8 364 kg/hm²,相当于最大生物量的 29%、33%、33%、39%。可见,施磷虽然促进了冬小麦在营养生长和生殖生长前期的生物量累积,但同时也增加了作物生长后期干物质的损失,高量施磷时,干物质的损失更为严重。

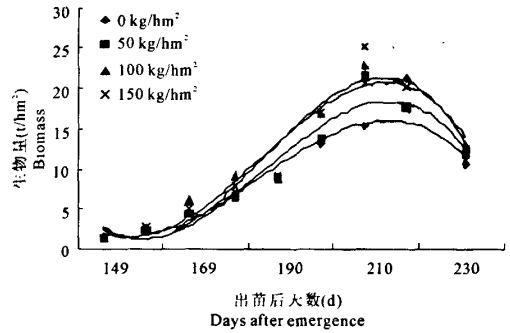


图 1 磷肥用量对冬小麦不同生长期生长的影响

Fig.1 Effects of phosphorus rates on growth of winter wheat at different growth stages

表 3 不同施磷量对冬小麦生物量累积量的影响

Table 3 Effects of phosphorus rates on maximum biomass and maximum biomass accumulation rate of winter wheat

施磷量 P rates (kg/hm ²)	生物量累积速率 Biomass accumulation rate		生物量累积 Biomass accumulation		收获期生物量 Biomass at harvest (kg/hm ²) ²⁾	回归方程的 R Regression equation R
	最大速率 Maximum rate [kg/(hm ² ·d)]	出现时间 Occurring time (d) ¹⁾	最大生物量 Maximum biomass (kg/hm ²)	出现时间 Occurring time (d) ¹⁾		
0	356	192	16045	223	11368	0.979 [*]
50	447	194	18471	223	12393	0.966 [*]
100	486	193	20778	222	13947	0.962 [*]
150	536	193	21415	222	13051	0.958 [*]

注: ¹⁾指出苗后的天数; ²⁾由拟合的一元三次曲线方程求得;当 n=9, r_{0.01}=0.798。下表同。

Note: ¹⁾ Days after emergence; ²⁾ values are calculated from the regressed cubic equation; when n=9, r_{0.01}=0.798. The same are in the following.

2.3 磷肥用量对冬小麦水分累积的影响

与生物量不同,冬小麦返青期后体内水分累积就开始迅速增加(图 2),但增加速度亦因施磷量而异(表 4)。施磷 50、100 和 150 kg/hm² 时,返青期水分累积速率分别为 816、989 和 902 kg/(hm²·d),不施磷时为 787 kg/(hm²·d),前者比后者分别高出 4%、25% 和 14%。但无论施磷与否,水分最大累积量均出现在抽穗前期(出苗后 190~193 d),施磷小麦的最大累积量分别为 24 282、28 399 kg/hm² 和 28 365 kg/hm²,比不施磷高 8%、26% 和 26%。说明施磷可促进冬小麦对土壤水分的吸收利用,使小麦在营养生长期植株保持较高的水分累积量,但高量施磷,作物体内水分不再增加。

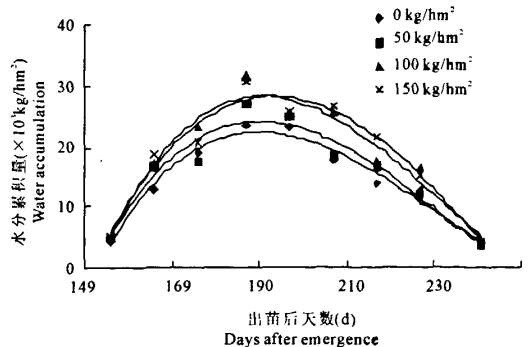


图 2 磷肥用量对冬小麦不同时期水分累积量的影响

Fig.2 Effects of phosphorus rates on water accumulation in winter wheat at different growth stages

抽穗后,随生长期后延(图 2,表 4),累积在冬小麦体内的水分开始损失。与最大水分累积量相比,不施磷和施磷 50、100、150 kg/hm² 时,到收获时水分累积量分别减少 18 345、20 525、23 250 kg/hm² 和 24 206 kg/hm²,占最大累积量的 81%,84%,82% 和

86%。与不施磷相比,施磷分别使生长后期水分多损失 12%,27%和 32%。表明施磷虽然促进了冬小麦在营养生长和生殖生长前期的水分累积,但同样也增加了作物生长后期水分的损失。

表 4 不同施磷量对冬小麦水分累积量与水分累积速率的影响

Table 4 Effects of phosphorus rates on the maximum water accumulation and accumulation rate in winter wheat

施磷量 P rates (kg/hm ²)	返青期水分累积速率		水分累积		收获期水分累积量 Water accumulation at harvest (kg/hm ²)	回归方程的 R Regression equation R
	Water accumulation rate at joining stage		Water accumulation			
	累积速率	出现时间	最大累积量	出现时间		
	Accumulation rate [kg/(hm ² ·d)]	Occurring time (d)	Maximum accumulation (kg/hm ²)	Occurring time (d)		
0	787	165	22539	190	4193	0.989 ^{**}
50	816	165	24282	190	3757	0.983 ^{**}
100	989	165	28399	191	5149	0.981 ^{**}
150	902	165	28365	193	4159	0.979 ^{**}

2.4 磷肥用量对小麦氮素累积的影响

返青后,随生长期后延冬小麦体内氮素的累积量逐渐增加,施磷量显著影响植株氮素累积量(图 3)。虽然氮素累积的最大速率均出现在拔节前期(出苗后 168~182 d,表 5),但施磷 100 kg/hm² 时,最大速率出现的时间明显提前;同时,施磷促进了累积速率的增加,施磷 100 和 150 kg/hm² 时,累积最大速率分别为 3.80 kg/(hm²·d)和 4.20 kg/(hm²·d),比不施磷增加 25%和 38%。到灌浆中期(出苗后 215~220 d),氮累积量均达到最大值,施磷小麦的最大累积量分别为 193、220 kg/hm² 和 248 kg/hm²,比不施磷高出 10%、25%和 41%。说明施磷可以促进小麦对土壤氮素吸收,适量施磷时氮素累积量和累积速率较早达到最大值。

50、100、150 kg/hm² 时,到收获期氮素累积分别减少 35、39、58 kg/hm² 和 85 kg/hm²,分别占最大累积量的 20%、20%、26%和 34%。可见,无论施磷与否,冬小麦生长后期,植株地上部均有明显的氮素损失。施磷使作物生长前期累积了较多的氮素,但同时也使生长后期的氮素损失增加。与不施磷相比,施磷分别使生长后期氮素损失增加 11%、63%和 143%。

2.5 磷肥用量对小麦磷素累积的影响

进入返青期后,冬小麦地上部磷素累积量逐渐增加,增加速率同样也受施磷量的影响。施磷 100 kg/hm² 时,磷素累积最大速率出现在拔节期前(出苗后 154 d),不施磷和施磷 50、150 kg/hm² 时为拔节初到抽穗前(出苗后 173~191 d)。而且随施磷量增加,磷素累积最大速率分别为 0.48、0.70、0.80 kg/(hm²·d),比不施磷时高 7%、56%、78%。到灌浆后期(出苗后 225~231 d),施磷 50、100 kg/hm² 和 150 kg/hm² 的小麦地上部磷素累积达到最大值,分别为 39.2、44.9 kg/hm² 和 49.9 kg/hm²;不施磷时,到收获期,累积量才达最大,仅为 33.2 kg/hm²。与不施磷相比,随施磷量提高,最大磷累积量分别提高 18%、35%、50%。说明施磷后作物的磷素吸收量和累积量均增加,与氮素的情况一致,较早达到最大速率和最大累积量。

收获时,施磷 100 kg/hm² 和 150 kg/hm² 的冬小麦地上部磷累积量分别下降 1.0 kg/hm² 和 6.6 kg/hm²,相当于最大累积量的 2%和 13%。表明高量施磷虽然提高了作物对磷的累积,但也会造成生长后期作物体内磷素的损失;适量施磷不仅可以促进磷的吸收,也可使生长前期营养体累积的磷,在灌

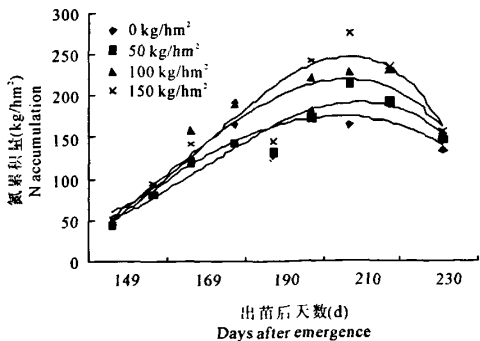


图 3 磷用量对不同时期冬小麦氮素累积量的影响

Fig.3 Effects of phosphorus rates on N accumulation in winter wheat at different growth stages

从灌浆中期开始,冬小麦地上部氮素累积量迅速下降(图 3)。与最大累积量相比,不施磷和施磷

浆期较充分地转入繁殖体,形成经济产量。

表 5 不同施磷量对冬小麦最大氮积累量与最大吸氮速率的影响

Table 5 Effects of phosphorus rates on the maximum N accumulation and accumulation rate of winter wheat

施磷量 P rates (kg/hm ²)	氮吸收速率 N uptake rate		氮积累量 N uptake		收获期积累量 N uptake at harvest (kg/hm ²)	回归方程的 R Regression equation R
	最大速率 Maximum uptake rate [kg/(hm ² ·d)]	出现时间 Occurring time (d)	最大吸氮量 Maximum N uptake (kg/hm ²)	出现时间 Occurring time (d)		
0	3.04	173	176	215	141	0.933 ^{**}
50	2.96	179	193	220	154	0.958 ^{**}
100	3.80	168	220	216	163	0.900 ^{**}
150	4.20	182	248	217	163	0.929 ^{**}

表 6 不同施磷量对冬小麦吸磷量与吸磷速率的影响

Table 6 Effects of phosphorus rates on the maximum P accumulation and accumulation rate of winter wheat

施磷量 P rates (kg/hm ²)	吸磷速率 P uptake rate		吸磷量 P uptake		收获期吸磷量 P uptake at harvest (kg/hm ²)	回归方程的 R Regression equation R
	最大速率 Maximum rate [kg/(hm ² ·d)]	出现时间 Occurring time (d)	最大吸磷量 Maximum P uptake (kg/hm ²)	出现时间 Occurring time (d)		
0	0.45	173	33.2	241	33.2	0.937 ^{**}
50	0.48	187	39.2	239	39.1	0.985 ^{**}
100	0.70	154	44.9	231	43.9	0.892 ^{**}
150	0.80	191	49.9	225	43.3	0.930 ^{**}

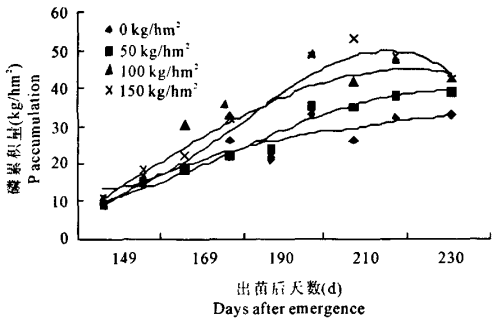


图 4 磷肥用量对不同时期冬小麦磷积累量的影响
Fig.4 Effects of phosphorus rates on P accumulation
in winter wheat at different growth stages

2.6 磷肥用量对小麦钾素累积的影响

返青以后,冬小麦地上部钾累积量逐渐增加(图 5)。随施磷量增加,钾累积的增加速率有提高趋势,且在拔节初期到中期(出苗后 173~181 d,表 7)达到最高速率。施磷 100 kg/hm² 和 150 kg/hm² 时,钾累积最大速率分别为 2.62 kg/(hm²·d) 和 2.65 kg/(hm²·d),比不施磷高 21% 和 22%;施磷 50 kg/hm² 时和不施磷时,最大累积速率无显著差异。

不施磷时,冬小麦地上部钾累积在抽穗期(出苗后 205 d)达到最大值,为 102.2 kg/hm²。施磷 50、100 kg/hm² 和 150 kg/hm² 时,灌浆初期(出苗后 211

~213 d),钾累积才达到最大值,随施磷量提高依次为 111.7、134.8 kg/hm² 和 138.2 kg/hm²,比不施磷提高 9%、32% 和 35%。表明施磷可以促进作物对钾的吸收和累积,且随施磷量提高,钾累积达到最大速率和最大值的时间有后延。

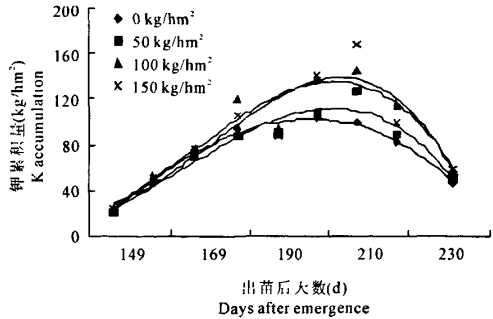


图 5 磷肥用量对不同时期冬小麦钾累积量的影响
Fig.5 Effects of phosphorus rates on K accumulation
in winter wheat at different growth stages

灌浆期以后,冬小麦地上部钾累积量迅速下降(图 5)。不施磷和施磷 50、100、150 kg/hm² 时,收获期钾累积量分别减少 55.6、62.5、76.1 kg/hm² 和 82.5 kg/hm²,占最大累积量的 54%、56%、56% 和 60%;与不施磷相比,施磷使生长后期的钾损失分别增加 12%、37% 和 48%。说明无论施磷与否,冬小

麦生长后期,地上部均有明显的钾素损失。施磷使更多的钾。
小麦生长前期累积了较多的钾,也使生长后期损失

表 7 不同施磷量对冬小麦吸钾量与吸钾速率的影响

Table 7 Effects of phosphorus rates on the maximum K accumulation and accumulation rate of winter wheat

施磷量 P rates (kg/hm ²)	吸钾速率 K uptake rate		吸钾量 K uptake		收获期吸钾量 K uptake at harvest (kg/hm ²)	回归方程的 R Regression equation R
	最大速率 Maximum rate [kg/(hm ² ·d)]	出现时间 Occurring time (d)	最大吸钾量 Maximum K uptake (kg/hm ²)	出现时间 Occurring time (d)		
0	2.17	173	102.2	205	46.6	0.991**
50	2.14	173	111.7	211	49.2	0.969**
100	2.62	174	134.8	211	58.7	0.951**
150	2.65	181	138.2	213	55.7	0.916**

3 讨 论

研究表明,适量(100 kg/hm²)施磷可显著提高冬小麦产量,不足(50 kg/hm²)或高量(150 kg/hm²)施磷,作物生长与产量形成均会受到抑制,处理间差异未达显著水平。由于不同施磷量对冬小麦的收获指数无显著影响,适量施磷引起的籽粒产量增加并不是由于干物质向籽粒的转移和分配增加,而是由于冬小麦生物量提高引起的。然而,由于产量增加引起的养分稀释效应^[13,14],使得适量施磷小麦籽粒的含氮量显著降低。与氮不同,籽粒磷、钾含量却有随施磷量增加而提高的趋势。

对不同时期生物量累积的分析表明,施磷可促进冬小麦营养生长拔节期和生殖生长前期的植株发育。但灌浆中期以后,小麦进入成熟阶段,生物量因植株衰老而开始损失^[15],施磷虽然促进了冬小麦生长前期的生物量累积,但同时也增加了生长后期的干物质损失,特别是高量施磷(150 kg/hm²)时,损失更为严重,无论是绝对,还是相对损失量均最高,相当于最大生物量的 39%。这可能是高量施磷不能进一步提高冬小麦收获期生物量和产量的一个重要原因。

不少研究表明,施磷可以促进根系发育,增强作物利用土壤水分养分的能力^[10,16,17]。本试验也表明,施磷显著促进了冬小麦对水分的吸收(表 4),但这种促进作用没有因为施磷量增加而持续增强,生长后期,累积在冬小麦体内的水分也开始损失,高量施磷冬小麦生长后期的水分损失严重。

与水分情况不同,随施磷量增加,冬小麦对氮、磷、钾的吸收明显增强。适量施用磷肥可使冬小麦以较高的累积速率,较早地达到养分累积速率的最高值。高量施磷,虽然也使养分吸收速率增加,但达到最大养分吸收速率的时间推迟(表 5~7),使得作

物在较长的时间内以较高的养分吸收速率累积了大量的养分。在生长后期,由于小麦贪青晚熟,营养物质向籽粒转移滞后,或是养分累积库的容量限制^[18,19],作物不能将这些养分充分地转移到穗部,形成经济产量。因此,高量施磷情况下,作物生长后期养分大量损失,产量并未明显提高。

高量施磷不仅不能提高作物产量,还会增加生长后期作物体内的氮磷钾养分损失,特别是氮以氨、氮氧化物等形式的气态氮损失及其环境效应,已引起了人们的高度重视。在农业生产实践中,磷与氮的养分管理同样重要,应当予以充分重视。

参 考 文 献:

[1] 刘毅,李东方,李世清.不同冬小麦品种对氮肥反应敏感性研究[J].西北植物学报,2005,25(10):1983—1991.
[2] Wang Zhao-Hui, Liu Xue-Jun, Ju Xiao-Tang, et al. Ammonia volatilization loss from surface-broadcast urea comparison of vented and closed-chamber methods and loss in winter wheat-summer maize rotation in north China plain[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2004,35(19,20):2917—2939.
[3] Bussink D W, Oenema O. Ammonia volatilization from dairy farming systems in temperate areas: a review[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998,51:19—33.
[4] Delgado J A, Khosla R, Bausch W C, et al. Nitrogen fertilizer management based on site-specific management zones reduces potential for nitrate leaching[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005,60(6):402—410.
[5] Yang Shengmao, Li Fengmin, Malhi S S, et al. Long-term fertilization effects on crop yield and nitrate nitrogen accumulation in soil in north-western China[J]. Agronomy Journal, 2004,96(4):1039—1049.
[6] 王生录.黄土高原旱地磷肥残效及利用率研究[J].水土保持研究,2003,10(1):71—75.
[7] 丁玉川,陈明昌,程滨,等.作物磷营养效率生理生化基础研究进展[J].山西农业科学,2004,32(3):25—29.
[8] 李绍长,白萍,龚江.作物磷效率研究进展[J].石河子大学学报,2002,6(3):251—254.
[9] 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.
- [10] 张岁岐, 山 仑, 薛青武. 氮磷营养对小麦水分关系的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(2): 147—151.
- [11] 孙慧敏, 于振文, 颜 红, 等. 施磷量对小麦品质和产量及氮素利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(2): 135—138.
- [12] 张 静, 王 艳. 不同磷水平玉米自交系根系形态及吸收氮、钾差异研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 88—90.
- [13] Calderini D F, Torres-Leon S, Slafer G A. Consequences of wheat breeding on nitrogen and phosphorus yield, grain nitrogen and phosphorus concentration and associated traits[J]. Journal Article] Annals of Botany, 1995, 76(3): 315—322.
- [14] 朱德群, 朱淑龄, 王 雁. 影响冬小麦籽粒蛋白质的几个生理参数[J]. 中国农业科学, 1992, 25(4): 30—35.
- [15] 石 岩, 位东斌, 于振文, 等. 控灌对小麦体内激素含量与籽粒灌浆速率的影响[J]. 西北植物学报, 1999, 19(3): 466—470.
- [16] 沈玉芳, 曲 东, 王保莉, 等. 干旱胁迫下磷营养对不同作物苗期根系导水率的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(2): 214—218.
- [17] 李 虹, 张锡梅. 不同基因型小麦苗期对低磷和水分胁迫的反应[J]. 干旱地区农业研究, 2001, 19(1): 72—78.
- [18] 董玉良, 劳秀荣, 毕建杰, 等. 麦玉轮作体系中秸秆钾对土壤钾库平衡的影响[J]. 西北农业学报, 2005, 14(3): 173—176.
- [19] 张 宾, 贺明荣, 吴翠平, 等. 灌浆期短暂无高温下减库对小麦籽粒品质的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(10): 108—110.

Effects of P rates on N P K and dry matter accumulation and grain yield of winter wheat

WANG Rong-hui^{1,2}, WANG Zhao-hui¹, LI Sheng-xiu¹, WANG Xi-na¹, LI Hua¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Soil and Fertilizer Research Institute, Guangdong Academy of Agri. Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract: In order to explain the phenomenon of the decrease of crop yield-increasing effects caused by over fertilizer application commonly existing in present agricultural production in China, this paper focused on the effects of P rates on N, P, K and dry matter accumulation and grain yield of winter wheat. A field experiment was carried out with winter wheat as test crop and at P rates of 0, 50 (deficient), 100 (optimum) and 150 (excessive) P_2O_5 kg/hm². The above-ground part of the crop was sampled at different stages to estimate the crop biomass and to determine the content of water, N, P and K in different plant parts. Furthermore, the relationship between grain yield and biomass accumulation, water and nutrient uptake in the plant was discussed. The obtained results showed that no significant difference was found for the harvest indexes over different P rates. One of the main reasons for the increase of grain yield caused by optimum P rates was owing to the increased biomass accumulation, but not the increased translocation of dry matter from vegetative part to grain at late growth stages. Excessive P application was observed to increase dry matter losses during late growth stages at 8 364 kg/hm², which accounted for 39% of maximum biomass accumulation and was 22% higher than that at optimum P application. The water accumulation rate at rejoining stage was 989 kg/(hm²·d) at optimum P rates, while is 902 kg/(hm²·d) at excessive P rate. However, water loss was 86% of maximum water accumulation at excessive P rates, which was 82% at optimum P rates during the late growth stages. Application of P promoted nutrient uptake at early growth stages, but also increased the nutrient losses at late growth stages with the increase of P rates. Compared to the maximum nutrient accumulation, the losses were 26% and 34% for N, 2% and 13% for P, and 26% and 34% for K, respectively at optimum and excessive P application. Excessive P application could not only decrease water accumulation at early growth stages, but also increase the losses of biomass, water, N, P and K at the late growing stages, and therefore led to a decrease of grain yield of winter wheat.

Keywords: P rates; winter wheat; yield; water; nitrogen; phosphorus; potassium