

关中平原夏玉米临界磷浓度稀释曲线构建与磷营养诊断

刘 苗, 刘朋召, 师祖姣, 王小利, 王 瑞, 李 军*

(西北农林科技大学农学院/农业农村部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】通过分析不同施磷水平下夏玉米地上部生物量与其植株磷浓度的变化关系, 构建临界磷浓度稀释曲线模型, 为夏玉米磷素优化管理及磷营养诊断提供理论基础。【方法】2019—2020 年在陕西关中平原, 以两个玉米品种郑单 958 和豫玉 22 为试验材料进行田间定位试验。共设 4 个施磷量处理 (P_2O_5): 0、60、120、180 kg/hm²。在夏玉米拔节期、抽雄期、灌浆期和成熟期进行地上部取样, 分析夏玉米地上部干物质质量、全磷含量以及产量。利用 2019 年试验数据构建夏玉米临界磷浓度稀释曲线模型和磷素营养指数, 利用 2020 年数据对模型进行验证。【结果】增施磷肥能显著提高夏玉米产量、地上部生物量和植株磷浓度, 两个品种之间没有显著差异。随施磷水平的提高, 夏玉米产量表现为先增加后减少, P120 处理可获得最高产量, 产量效应方程显示两年两个品种夏玉米平均理论最高产量对应的施磷量为 110.2 kg/hm²。由产量构成要素看出, 施磷对穗数没有显著影响, 但能显著提高穗粒数和百粒重, 且施磷对玉米穗粒数的影响大于对百粒重的影响。地上部生物量表现为 $P_0 < P_{60} < P_{180} < P_{120}$ 处理, 但 P_{180} 与 P_{120} 处理间差异不显著。玉米植株磷浓度均随施磷水平的提高而增加, 并随生育进程的推进和地上部生物量的增加而降低。根据 2019 年地上部干物质重与其磷浓度变化关系构建夏玉米临界磷浓度 (P_c) 变化曲线: $P_c = 8.11DM^{-0.22}$ ($R^2 = 0.886$)。模型拟合的植株磷浓度和 2020 年玉米实际磷浓度线性相关, 稀释曲线模型的 $RMSE$ 和 $n-RMSE$ 分别为 1.146 和 18.23%, 说明模型具有较好的稳定性。基于临界磷浓度稀释曲线计算磷营养指数 (PNI), 各生育时期 PNI 值随磷肥用量增加而增大, 随生育进程推进呈现先升高后降低趋势。PNI 与相对吸磷量 (RP_{up})、相对地上部生物量 (RDW) 和相对产量 (RY) 均呈极显著相关。【结论】本研究建立的夏玉米临界磷浓度稀释曲线和磷营养指数 (PNI) 模型能够很好地预测植株不同生育时期的磷素盈亏状况, 对指导夏玉米生长季磷素营养诊断及最佳磷肥施用量具有可行性。

关键词: 夏玉米; 施磷量; 临界磷稀释曲线; 磷营养指数

Critical phosphorus dilution curve and phosphorus nutrition diagnosis of summer maize in Guanzhong Plain

LIU Miao, LIU Peng-zhao, SHI Zu-jiao, WANG Xiao-li, WANG Rui, LI Jun*

(College of Agronomy, Northwest A&F University/Key Laboratory of Crop Physicology and Tillage Science in Northwestern Loess Plateau, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objectives】 This study analyzes the relationship between aboveground biomass and maize phosphorus (P) content under different P application rates to construct a critical P dilution curve for fast diagnosis of maize P nutrition. 【Methods】 Field experiments were conducted in Guanzhong Plain, Shaanxi Province in 2019 and 2020, using the maize cultivars Zhengdan 958 (ZD958) and Yuyu 22 (YY22) as test materials. The four treatments of P_2O_5 application rates were 0, 60, 120, and 180 kg/hm². The aboveground parts of maize plants were sampled at jointing, tasseling, filling, and maturity stages to determine dry matter accumulation, P concentration, and yield. The data obtained in 2019 were used to construct the critical P dilution curve model and the corresponding P nutrition index (PNI). The data obtained in 2020 were used to verify the models' accuracy.

收稿日期: 2021-02-05 接受日期: 2021-05-12

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2015BAD22B02); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2013AA102902); 国家自然科学基金项目 (31801300)。

联系方式: 刘苗 E-mail: 3318757297@qq.com; * 通信作者 李军 E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn

【 Results 】 Increased P application rate ($P < 0.05$) increased yield, aboveground biomass, and P concentration of summer maize, but there was no significant difference ($P > 0.05$) between the two varieties. With increasing P application rate, the yield of summer maize increased at first and later decreased, with P120 treatment recording the highest. The yield effect equation showed that the average theoretical maximum yield of the two varieties of summer maize in the years under study corresponds to a P application rate of 110.2 kg/hm². P application had no significant effect ($P > 0.05$) on the number of ears per hectare but increased the kernel number per ear and 100-grain weight. However, the effect of the application on kernel number per ear was greater than that on 100-grain weight. The aboveground biomass was in the order P0 < P60 < P180 < P120, with no significant difference ($P > 0.05$) between P180 and P120 treatments. Maize P concentration increased with increasing P application rate; however, it decreased with the advancement of growth and the accumulation of aboveground dry matter by weight. Based on the aboveground dry matter weight and P concentration of maize plants in 2019, the critical P dilution curve model for summer maize was established as: $P_c = 8.11DM^{-0.22}$ ($R^2 = 0.886$). The RMSE and n-RMSE between the calculated and the measured plant P concentrations in 2020 were 1.146 and 18.23%, showing high accuracy. The PNI values calculated with the critical P concentration curves increased and decreased across the growth stages, and this was augmented by increased P application at each growth stage. PNI was also positively correlated with relative P uptake (RP_{upt}), relative aboveground biomass (RDW), and relative yield (RY). 【 Conclusions 】 The constructed critical P dilution curve model and P nutrition index model (PNI) could help predict P nutrition conditions of summer maize at different growth periods. Therefore, it is useful for instant P nutrition diagnosis and optimal P fertilization in summer maize.

Key words: summer maize; phosphorus application rate; critical phosphorus dilution curve; phosphorus nutrition index

陕西关中地区以冬小麦-夏玉米一年两熟制为主。玉米作为该地区主要粮食作物之一,在我国粮食生产中占有举足轻重的地位,其持续增产是保障粮食安全的关键^[1]。磷是玉米生长发育所必需的大量营养元素之一^[2],施磷可以促进植株营养器官生长和产量构成要素的形成,在提高玉米产量和品质方面发挥着其他肥料不可替代的作用^[3-5]。但过量施磷会造成磷素流失、磷肥利用效率下降^[6]。由于缺乏明确的磷素营养诊断指标,难以准确判断玉米植株磷素营养状况,生产中不合理施磷现象常有发生。调查发现,关中平原夏玉米施磷量很低的农户平均占 63.6%,施磷量偏高的农户平均占 19.7%,磷肥供应不足或过量均影响玉米产量的进一步提高^[7]。然而,磷在植物体内移动性较强,在各器官的积累和分配对植物生长发育和提高肥料利用率有重要作用^[8]。临界磷浓度稀释曲线可作为作物磷盈亏诊断的方法,其核心在于确定作物的临界磷浓度。临界磷浓度是指作物获得最大地上部生物量所需要的最低磷浓度^[9-10]。随生育进程的推进,作物体内的临界磷浓度会随生物量的增加而降低,二者存在幂指数关系 ($P_c = aDM^{-b}$)^[11-12]。国内外学者已在不同地区、不同气候条

件及不同作物上建立了临界磷浓度稀释曲线模型,如马铃薯^[9,11]、棉花^[13]、梯牧草^[10]等,其临界磷浓度稀释模型分别为 $P_c = 3.92DM^{-0.30}$ 和 $P_c = 5.23DM^{-0.19}$ 、 $P_c = 7.84DM^{-0.22}$ 和 $P_c = 7.74DM^{-0.20}$ 、 $P_c = 5.23DM^{-0.4}$ 和 $P_c = 3.27DM^{-0.20}$ 等。在玉米施磷研究中,国内外学者主要集中在植株生长发育、磷素营养吸收转运^[5,14-15]及土壤磷素盈亏状况等^[16-17]对产量的响应,而从临界磷浓度稀释曲线模型角度分析玉米地上部植株磷营养状况及适宜施磷量的研究鲜有报道。因此,本研究通过分析不同施磷水平下夏玉米地上部生物量与其植株磷浓度的变化关系,构建临界磷浓度稀释曲线模型,为夏玉米磷素优化管理及磷营养诊断提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验设置于西北农林科技大学北校区农作一站 (108°06'E、34°29'N, 海拔 454.8 m), 位于陕西关中平原西部杨凌示范区, 属暖温带半湿润季风性气候, 年平均气温 12.9℃, 降水量 635.1 mm, 无霜期 211 天。2019 和 2020 年夏玉米全生育期降水量分别

为 527.2 和 673.9 mm, 逐月降水量如图 1 所示。供试土壤为塋土, 0—20 cm 土层土壤养分含量见表 1。

1.2 试验设计

基于 2009 年起实施的关中平原冬小麦—夏玉米一年两熟制长期定位施肥试验, 本研究测定和分析了 2019—2020 年夏玉米地上部生物量、植株全磷含量及产量的关系。田间试验采取施磷量和品种二因素裂区设计, 品种为主处理, 供试玉米品种为郑单 958 和豫玉 22, 施磷量为副处理, 设置 0、60、120、180 kg/hm² 4 个施磷量 (P₂O₅) 处理, 分别以 P0、P60、P120 和 P180 表示, 所用磷肥为过磷酸钙 (P₂O₅ 质量分数 16%)。按照关中夏玉米常用施氮量, 各施磷处理均配施纯氮 225 kg/hm², 所用氮肥为尿素 (纯 N 含量 46%), 氮磷肥全部基施, 因供试塋土富含钾素 (表 1), 本试验中不施钾肥。小区面积 30 m², 3 次重复, 2019 和 2020 年夏玉米播种日期分别为 6 月 16 日和 6 月 10 日, 种植密度为 67500 株/hm², 收获期分别为 10 月 7 日和 10 月 1 日。夏玉米全生育期内不灌水, 病虫草害等其他田间管理措施同当地大田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株干重及养分含量测定 在夏玉米拔节期 (V6)、抽雄期 (VT)、灌浆期 (R2) 和成熟期 (R6) 采集

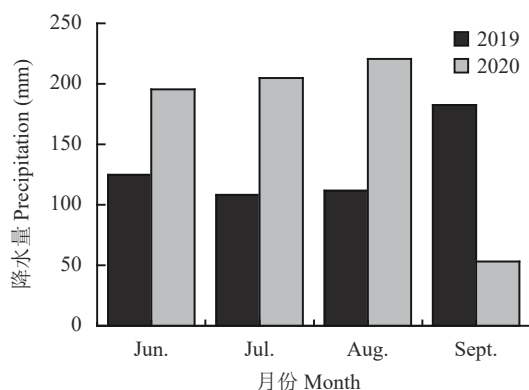


图 1 2019、2020 年夏玉米生长季月降水量

Fig. 1 Monthly precipitation during summer maize growing season in 2019 and 2020

植株地上部样本, 每个小区采取有代表性的玉米 3 株, 分为茎秆、叶片和穗 3 部分, 灌浆期和成熟期将穗部分为苞叶、穗轴和籽粒, 于 105℃ 杀青 30 min 后, 80℃ 烘干至恒重, 称重并计算地上部干物质重; 样品粉碎过 0.425 mm 筛, 采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 钒钼黄比色法测定植株全磷含量。

1.3.2 产量测定 在夏玉米成熟期选取各小区中间长势均匀、行长 2 m 的 2 行玉米, 统计植株果穗数量, 换算出单位面积穗数。在行内选取 10 个均匀果穗, 取 3 次重复, 分别调查穗行数和行粒数, 计算平均穗粒数。通过风干上述 2 行果穗、脱粒后测产换算单位面积产量, 再选取均匀籽粒测定百粒重, 籽粒按 14% 含水量折算产量。

1.4 模型构建与参数计算

1.4.1 临界磷稀释曲线模型的建立及验证 作物的磷浓度随生物量的增加而下降, 临界磷浓度是指作物获得最大地上部生物量时所需的最低磷浓度^[9-10]。采用 2019 年的试验数据参照 Belanger 等^[10]的方法, 根据每个取样时期的理论最大地上部生物量和与之相应的磷浓度, 建立夏玉米临界磷浓度稀释曲线模型, 具体步骤如下: 1) 取同一时期不同施磷水平植株地上部生物量, 测定对应的植株磷浓度, 通过方差分析判断作物生长是否受到磷素限制; 2) 对于施磷量不能满足作物生长需求的全部处理, 将地上部干物质质量与磷浓度值进行线性拟合; 3) 对于施磷量能满足作物生长需求的全部处理, 取地上部干物质质量平均值为最大值; 4) 以最大地上部干物质质量为横坐标, 向 x 轴做垂线, 使之与经过线性拟合后形成的直线相交, 交点纵坐标值就是该取样时期的理论临界磷浓度值。夏玉米临界磷浓度稀释曲线模型为: $P_c = aDM^{-b}$ 式中, P_c (g/kg) 为临界磷浓度; DM (t/hm²) 为夏玉米地上部生物量的最大值; 参数 a 为地上部生物量达 1 t/hm² 时的植株临界磷浓度; 参数 b 为决定临界磷浓度稀释曲线斜率的统计学参数^[12]。

采用 2020 年的试验数据根据国际通用的回归估计标准误差均方根误差 $RMSE^{[18]}$ 和标准化均方根误差 $n-RMSE^{[19]}$ 来检测模型的拟合度。

表 1 供试土壤基本养分状况

Table 1 The basic nutrient characteristics of the tested soils

年份 Year	有机质 Organic matter (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	全钾 Total K (g/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	硝态氮 Nitrate N (mg/kg)	铵态氮 Ammonium N (mg/kg)
2019	19.03	1.09	0.91	10.04	12.73	134.01	9.96	4.72
2020	18.76	1.05	0.97	9.96	13.33	157.29	15.63	4.91

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}}$$

$$n-RMSE = \frac{RMSE}{O} \times 100\%$$

式中: O_i 、 S_i 分别为临界磷浓度测定值和模拟值; n 为样本量; O 为实测数据的平均值。 $RMSE$ 值越小, 模拟值与测定值的一致性越好, 偏差越小, 即模型的预测精确度越高。 $n-RMSE < 10\%$, 模型稳定性极好; $10\% \leq n-RMSE < 20\%$, 模型稳定性较好; $20\% \leq n-RMSE < 30\%$, 模型稳定性一般; $n-RMSE \geq 30\%$, 则认为模型稳定性较差^[20]。

1.4.2 夏玉米磷营养指数计算 作物磷营养指数 (PNI) 为植株地上部磷浓度的实测值与根据临界磷浓度稀释模型求得的相应生物量的临界磷浓度值的比值, 采用下式计算:

$$PNI = \frac{P_a}{P_c}$$

式中, PNI 为磷营养指数, P_a 为玉米地上部磷浓度实测值 (g/kg); P_c 为根据临界磷浓度稀释模型求得的临界磷浓度值 (g/kg)。PNI 可直观反映植株体内磷素的营养状况, 若 $PNI < 1$, 表明植株磷营养缺乏, $PNI = 1$, 表明植株磷营养处于最佳状态; $PNI > 1$, 表现为植株磷营养过剩^[9]。

相对吸磷量 (relative phosphorus uptake, RP_{upt}) = 植株地上部吸磷量/同一生育时期吸磷量的最大值; 相对地上部生物量 (relative dry biomass, RDW) = 地上部生物量/同一生育时期地上部生物量的最大值; 相对产量 (relative yield, RY) = 实际产量/产量的最大值。

1.5 数据处理

用 2019 年 2 个玉米品种在 4 个施磷水平下、4 个生育时期的地上部生物量与与之相应的磷浓度实测数据 ($n=64$) 确定临界磷浓度值, 最终筛选 8 个点, 建立夏玉米临界磷浓度稀释曲线模型, 用 2020 年田间实测数据 ($n=64$) 同样筛选 8 个点, 对建立的临界磷浓度稀释曲线模型稳定性进行验证。试验数据分析采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 22.0 统计软件, 多重比较采用 Duncan's 法 ($P = 0.05$), 用 Origin 2015 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同施磷处理对夏玉米产量及其构成因素的影响

如表 2 所示, 各施磷处理玉米产量均高于不施

磷肥 (P0) 处理, 且施磷处理产量与 P0 处理差异多达到显著水平 ($P < 0.05$)。在不同施磷处理中, 产量随施磷水平的提高先增后降, 以 P120 处理产量最高。与 P0 处理相比, P120 处理下郑单 958 和豫玉 22 在 2019 年分别增产 15.7% 和 5.81%, 2020 年分别增产 16.9%、7.63%。过量施磷 (P180) 产量并未随之提高, 反而有所下降。2019 年, 郑单 958 和豫玉 22 在 P180 处理的产量比 P120 处理分别下降 6.29% 和 2.11%, 2020 年郑单 958 和豫玉 22 分别下降 5.33%、3.39%。各施磷处理下玉米穗数无显著差异, 穗粒数和百粒重有差异。穗粒数两年变化趋势一致, 各施磷处理均高于不施磷肥处理, 且随施磷水平的提高先增后降, P120 处理最高。2019 年郑单 958 和豫玉 22 在 P120 处理分别较 P0、P60、P180 处理提高 11.51%、1.28%、8.9% 和 18.14%、4.37%、7.32%, 2020 年 P120 处理下郑单 958 和豫玉 22 比 P0、P60、P180 处理分别提高 4.42%、0.26%、2.7% 和 3.62%、1.01%、3.44%。而两个品种的百粒重变化趋势存在差异, 2020 年两个品种百粒重随施磷量的提高先增加后减少, P120 达到最高, 但与 P60 处理间差异不显著; 2019 年 P0 和 P180 处理下的百粒重较大, 但最终产量却未达较高水平, 说明施磷对玉米穗粒数的影响大于对百粒重, 适宜的施磷水平可提高穗粒数和百粒重, 最终影响产量。进一步将施磷量和产量进行二次曲线拟合 (图 2), 由拟合曲线得到两年两个品种夏玉米的平均理论适宜施磷量为 110.2 kg/hm²。

2.2 不同施磷处理夏玉米地上部生物量及磷浓度动态变化

2.2.1 施磷量对夏玉米地上部生物量的影响 从图 3 可以看出, 随生育进程的推进, 玉米地上部生物量逐渐增加, 成熟期达到最高, 且随施磷水平的提高地上部生物量先增加后减少 (2019 年), P120 和 P180 处理间差异不显著, 说明过量施磷并不能持续提高地上部干物质积累量。由于 2020 年玉米拔节期后的降水总量大于 2019 年 (图 1), 地上部生物量也呈现明显差异, 2020 年地上部生物量明显高于 2019 年。

2.2.2 施磷量对夏玉米植株磷浓度的影响 夏玉米植株磷浓度随生育时期推进逐渐下降, 在同一取样时期, 均随施磷量增加而升高 (图 4)。相比 2019 年, 2020 年玉米拔节至抽雄期降水量较高, 植株营养生长旺盛, 体内积累的磷素含量较多, 且下降缓慢。抽雄至灌浆期充足的水分使得叶片和茎秆

表 2 不同施磷量对夏玉米产量和产量构成因素的影响 (2019、2020)

Table 2 Summer maize yield and yield components as affected by P application rates in 2019 and 2020

品种 Variety	施磷处理 P treatment (P ₂ O ₅ , kg/hm ²)	2019				2020			
		穗数 Ear number (ears/hm ²)	穗粒数 Kernel number per ear	百粒重 100-grain weight (g)	产量 Yield (kg/hm ²)	穗数 Ear number (ears/hm ²)	穗粒数 Kernel number per ear	百粒重 100-grain weight (g)	产量 Yield (kg/hm ²)
ZD958	0	66501 ± 283 a	413.0 ± 5.2 b	33.8 ± 3.5 a	7450 ± 133 b	67499 ± 329 a	432.9 ± 2.0 b	37.0 ± 3.1 ab	9464 ± 98 c
	60	67147 ± 531 a	454.8 ± 5.0 a	31.7 ± 0.6 b	8457 ± 308 a	68026 ± 102 a	450.9 ± 4.8 a	37.7 ± 2.8 a	9859 ± 12 ab
	120	66909 ± 81 a	460.5 ± 1.6 a	32.4 ± 5.1 b	8618 ± 517 a	67885 ± 101 a	452.1 ± 1.7 a	37.8 ± 3.8 a	10015 ± 32 a
	180	66507 ± 64 a	422.9 ± 0.4 b	33.5 ± 0.4 a	8076 ± 134 ab	68024 ± 127 a	440.2 ± 7.5 ab	36.6 ± 0.6 b	9804 ± 94 b
YY22	0	66215 ± 135 a	367.2 ± 0.8 c	36.4 ± 5.3 b	7452 ± 19 c	67718 ± 248 a	446.5 ± 1.0 c	35.6 ± 3.3 b	9385 ± 136 c
	60	66412 ± 212 a	415.7 ± 6.9 b	35.8 ± 2.6 b	8476 ± 70 ab	68225 ± 221 a	458.0 ± 4.6 ab	35.8 ± 2.9 ab	9840 ± 91 b
	120	66221 ± 85 a	433.8 ± 4.4 a	37.8 ± 1.9 a	8708 ± 11 a	67482 ± 710 a	462.6 ± 3.6 a	37.0 ± 5.5 a	10101 ± 41 a
	180	66146 ± 262 a	404.2 ± 2.3 b	36.5 ± 0.1 b	8244 ± 223 b	67450 ± 244 a	447.3 ± 5.4 bc	36.9 ± 3.7 a	9758 ± 46 b
方差分析 ANOVA									
品种 Variety (V)		**	***	***	NS	NS	**	***	NS
施磷量 P rate (P)		NS	***	**	***	NS	***	*	***
品种×施磷量 V×P		NS	***	**	NS	NS	**	**	NS

注 (Note): 同列数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column indicated significant difference among treatments at the 5% level. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; ***— $P < 0.001$; NS—差异不显著 No significant difference.

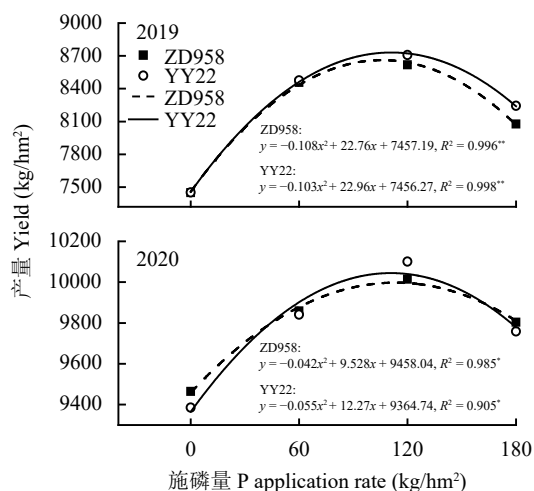


图 2 夏玉米产量与施磷量的相关性

Fig. 2 Correlations between summer maize yield and P application rate

[注 (Note): *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.]

中磷素及时向籽粒转运, 植株磷素下降速率增加。方差分析结果 (表 3) 表明, 不同施磷量、不同年份间两个品种夏玉米地上部生物量、植株磷含量存在显著或极显著差异, 但两个品种间 (除拔节期外) 植株磷浓度不存在显著差异, 这表明利用两个品种的数据建立模型具有可行性。

2.3 夏玉米临界磷浓度稀释曲线模型的建立及验证

2.3.1 模型建立 利用 2019 年 2 个玉米品种 4 个生育时期观测的全部试验数据 ($n = 64$), 根据 1.4 临界磷浓度变化曲线方程的构建方法, 将玉米不同施磷水平下植株地上部生物量与对应的植株磷浓度进行回归曲线拟合, 得出每次取样时期的临界磷浓度值 (P_c)。在拔节期、抽雄期、灌浆期和成熟期郑单 958 的 P_c 分别为 6.96、5.49、4.71、3.70 g/kg, 最大地上部干物质质量 (DM) 分别是 1.60、6.60、13.58、17.74 t/hm²; 豫玉 22 的 P_c 分别为 7.33、5.85、4.99 和 3.86 g/kg, 对应 DM 则为 1.70、6.85、13.39 和 17.78 t/hm²。由临界磷浓度值及对应的地上部最大干物质质量进行幂函数拟合, 构建玉米整个生育期的临界磷浓度稀释曲线 $P_c = 8.11DM^{-0.22}$ (图 5), 方程的决定系数 R^2 为 0.886, 达到极显著水平 ($P < 0.001$)。此外, 利用每个取样时期所测植株磷浓度的最小、最大值 (P_{min} 、 P_{max}), 得到夏玉米磷素稀释边界模型, 分别为 $P_{min} = 7.44DM^{-0.22}$, $R^2 = 0.920$ ($P < 0.001$) 和 $P_{max} = 8.82DM^{-0.23}$, $R^2 = 0.890$ ($P < 0.001$)。

2.3.2 模型验证 使用 2020 年 2 个品种 4 个生育时期观测的试验数据 ($n=64$), 验证 2019 年构建的模

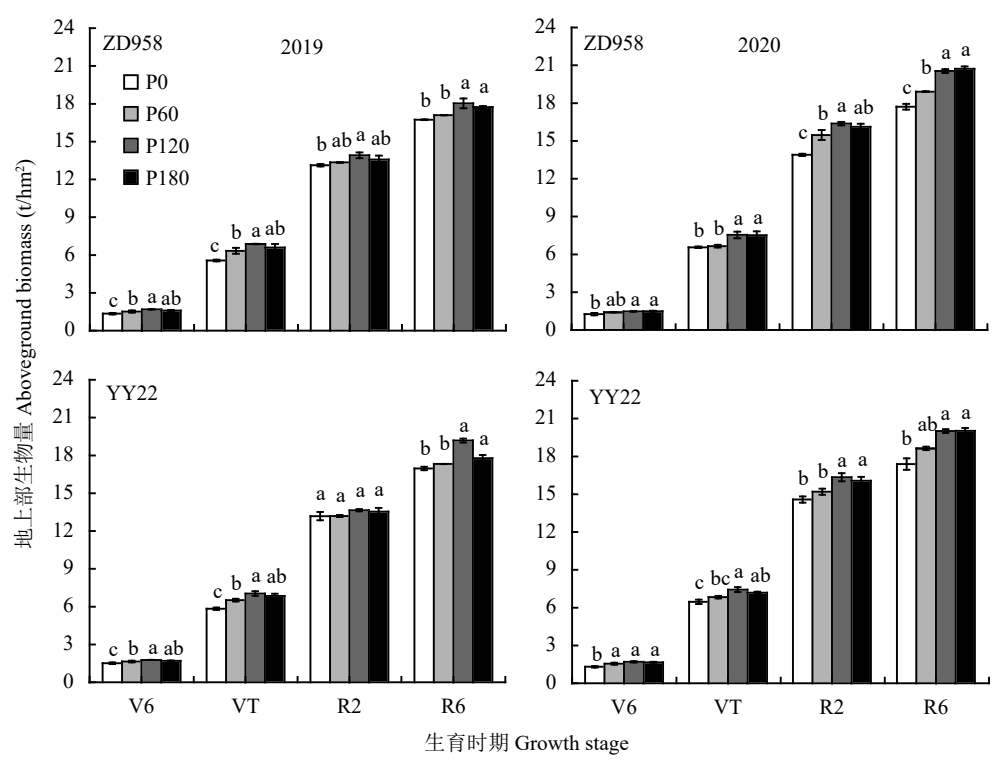


图 3 施磷量对夏玉米地上部生物量累积的影响

Fig. 3 Effects of P application rate on the dynamics of aboveground dry biomass

[注 (Note): V6—拔节期 Jointing stage; VT—抽雄期 Tasseling stage; R2—灌浆期 Filling stage; R6—成熟期 Maturity stage. 柱上不同字母表示同一年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) The different lowercase letters above the bars indicate significantly different among treatments in the same year ($P < 0.05$).]

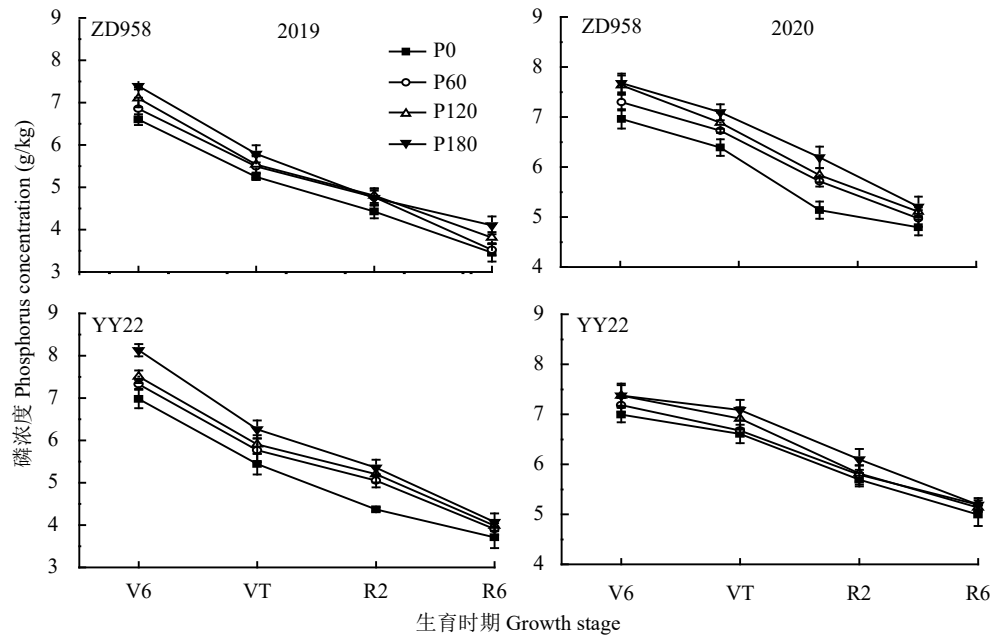


图 4 施磷量对夏玉米植株磷浓度变化的影响

Fig. 4 Effects of P application rate on the dynamic changes of P concentration in summer maize

[注 (Note): V6—拔节期 Jointing stage; VT—抽雄期 Tasseling stage; R2—灌浆期 Filling stage; R6—成熟期 Maturity stage.]

型校验精度。具体步骤为：将数据中的最大干物质
量带入临界磷浓度稀释曲线模型后，对比模拟值与
测定值，根据公式得出临界磷浓度稀释曲线的 $RMSE =$
 1.146 ， $n-RMSE = 18.23\%$ (表 4)；夏玉米磷稀释模型

表 3 夏玉米不同生育时期地上部生物量和植株全磷含量的方差分析

Table 3 Variance analysis of aboveground biomass and P content at different stages of summer maize

因子 Factors	V6		VT		R2		R6	
	DM (t/hm ²)	P _a (g/kg)	DM (t/hm ²)	P _a (g/kg)	DM (t/hm ²)	P _a (g/kg)	DM (t/hm ²)	P _a (g/kg)
ZD958	1.47	7.18	6.70	6.14	14.48	5.21	18.44	4.36
YY22	1.61	7.37	6.77	6.29	14.47	5.41	18.41	4.59
2019	1.60	7.24	6.45	5.68	13.44	4.83	17.61	3.82
2020	1.48	7.32	7.02	6.85	15.51	5.79	19.25	5.13
P0	1.36	6.88	6.10	5.91	13.69	4.91	17.20	4.24
P60	1.53	7.16	6.58	6.16	14.3	5.33	17.99	4.39
P120	1.66	7.40	7.22	6.31	15.07	5.41	19.44	4.51
P180	1.61	7.66	7.04	6.68	14.83	5.60	19.07	4.77
F 值 F-value								
年份 Year (Y)	37.84***	0.295 ^{NS}	87.36***	114.9***	84.83***	86.03***	45.31***	139.6***
品种 Variety (V)	51.29***	1.53 ^{NS}	1.11 ^{NS}	2.59 ^{NS}	0.002 ^{NS}	3.74 ^{NS}	0.01 ^{NS}	4.15 ^{NS}
施磷量 P rate (P)	49.25***	4.88**	67.63***	8.49**	7.44**	7.91**	17.61***	4.11*
Y×V	0.539 ^{NS}	4.22 ^{NS}	6.49*	0.44 ^{NS}	0.163 ^{NS}	0.622 ^{NS}	3.17 ^{NS}	0.071 ^{NS}
Y×P	0.81 ^{NS}	0.366 ^{NS}	2.84 ^{NS}	0.204 ^{NS}	2.38 ^{NS}	0.569 ^{NS}	2.59 ^{NS}	0.101 ^{NS}
V×P	0.293 ^{NS}	0.074 ^{NS}	0.588 ^{NS}	0.512 ^{NS}	0.343 ^{NS}	0.048 ^{NS}	0.275 ^{NS}	0.139 ^{NS}
Y×V×P	2.14 ^{NS}	0.164 ^{NS}	0.996 ^{NS}	0.199 ^{NS}	0.133 ^{NS}	1.85 ^{NS}	0.318 ^{NS}	0.585 ^{NS}

注 (Note) : V6—拔节期 Jointing stage; VT—抽雄期 Tasseling stage; R2—灌浆期 Filling stage; R6—成熟期 Maturity stage. DM—地上部生物量 Aboveground biomass; P_a—植株实际全磷含量 Actual phosphorus content. *— $P<0.05$; **— $P<0.01$; ***— $P<0.001$; NS—差异不显著 No significant difference.

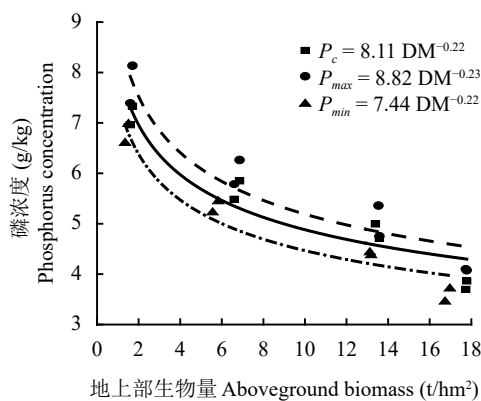


图 5 夏玉米地上部生物量磷浓度稀释曲线

Fig. 5 The P dilution model of summer maize aboveground dry biomass (DM)

有较高的稳定性,表明本研究所建立的临界磷稀释曲线可进一步用于玉米植株磷营养诊断。

2.4 不同施磷处理对夏玉米磷营养指数的影响

随施磷水平的提高,各生育时期夏玉米磷素营养指数 (PNI) 不断升高,对于同一施磷处理 (除

P0 外), PNI 随玉米生育进程的推进先增大后减小 (图 6)。P0 和 P60 处理 PNI 值均小于 1, 不施磷处理植株磷素亏缺程度随生育进程的推进愈发明显,影响地上部生物量累积。P60 和 P120 处理磷营养指数在 1.0 附近变化,植株磷营养状况较好,说明适宜施磷量位于 60~120 kg/hm²。而 P180 处理夏玉米各生育时期的 PNI 值明显大于 1,说明植株对磷素奢侈吸收,磷营养过剩。

2.5 磷营养指数与相对吸磷量、相对地上部生物量和相对产量之间的关系

为进一步验证夏玉米临界磷浓度稀释模型的合理性,利用 2019 和 2020 年各取样时期的数据研究玉米磷营养指数 (PNI) 与相对吸磷量 (RP_{upt})、相对地上部生物量 (RDW) 和相对产量 (RY) 之间的关系。如图 7 和图 8 所示,夏玉米不同生育时期的 PNI-RP_{upt} 和 PNI-RDW 均表现为线性相关,且 RP_{upt} 和 RDW 均随 PNI 的增加而增加,拔节期、抽雄期、灌浆期、成熟期回归方程决定系数分别为 0.623、0.850、0.622、0.460 和 0.639、0.612、0.493、

表 4 夏玉米临界磷浓度测定值与模拟值

Table 4 Observed and simulated values of critical P concentration of summer maize

生育时期 Growth stage	品种 Cultivar	测定值 Observed value	模拟值 Simulated value	误差 Error
V6	ZD958	7.605	7.432	0.173
	YY22	7.267	7.250	0.017
VT	ZD958	6.802	5.203	1.599
	YY22	6.780	5.255	1.525
R2	ZD958	5.776	4.399	1.377
	YY22	5.851	4.434	1.417
R6	ZD958	4.992	4.162	0.829
	YY22	5.191	4.194	0.997
RMSE			1.146	
n-RMSE			18.23%	

注 (Note): V6—拔节期 Jointing stage; VT—抽雄期 Tasseling stage; R2—灌浆期 Filling stage; R6—成熟期 Maturity stage.

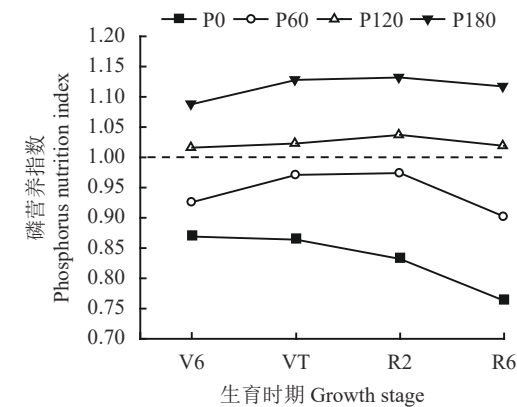


图 6 不同施磷量下夏玉米磷营养指数 (PNI) 动态变化

Fig. 6 Dynamic changes in phosphorus nutrition index (PNI) under different P application rates to summer maize

[注 (Note): V6—拔节期 Jointing stage; VT—抽雄期 Tasseling stage; R2—灌浆期 Filling stage; R6—成熟期 Maturity stage.]

0.592, 均达到极显著水平。玉米相对产量随磷素营养指数的增加呈一元二次曲线增加 (图 9), 回归方程决定系数分别为 0.679、0.708、0.660 和 0.668, 达到极显著水平。其中, 成熟期的二次项系数最大, 说明生育后期的磷素营养对于玉米获得高产具有重要作用。拔节期、抽雄期、灌浆和成熟期相对产量最大时的 PNI 值分别为 0.998、1.030、1.022 和 0.987, 继续提高各时期的磷素营养指数, 各时期对应的相对产量基本不再增加, 反而减少。

3 讨论

3.1 夏玉米临界磷浓度稀释曲线特征

磷是玉米生长发育必需的第二大营养元素^[21], 参

与大部分生理代谢过程, 如促进氮素吸收、参与光合磷酸化、促进碳水化合物代谢等^[22], 良好的磷素营养能有效扩大玉米根系生长, 提高植株持水能力, 增加籽粒饱满度^[23]。但在实际生产中, 关中地区磷肥用量存在不足或过量现象^[7], 因此, 建立快速有效的诊断玉米植株磷素营养状况的技术方法显得尤为重要。明确玉米在全生育期的临界磷浓度是实现磷素营养诊断以及合理施用磷肥的基础。临界磷浓度的研究已在多种作物^[9]上开展, 但在玉米上的研究还未见报道。因此, 本研究利用 2 年田间定位试验数据建立关中地区夏玉米生长季的临界磷浓度稀释曲线, 模型表达式为 $P_c = 8.11DM^{-0.22}$, 决定系数 0.886 ($P < 0.001$), 拟合度达到极显著水平。 $P_c = aDM^{-b}$ 中, 参数 a 表征植株地上部生物量为 1 t/hm² 时的临界磷浓度, 反映作物生育期内在的需磷特性。参数 b 描述的是植株磷含量随地上部生物量增加的递减关系, 其大小主要决定于磷素吸收量与地上部生物量的关系。与前人在马铃薯^[9,11]、梯牧草^[10]、小麦^[12]、棉花^[13]的研究结果相比, 本研究建立的模型中, 参数 a 较高, 参数 b 偏高或偏低。Belanger 等^[12]研究发现, 小麦的临界磷浓度稀释曲线因地点不同参数不同, 参数 a 值范围为 3.62~4.94, b 值范围为 0.21~0.49, 说明临界磷浓度稀释曲线模型的参数因受作物类型、品种、作物生长的生态气候等影响而存在差异。因此, 有必要在玉米上建立相应临界磷浓度模型, 为玉米磷营养管理提供理论依据。

本研究利用 2019 年试验数据构建模型, 用 2020 年试验数据对构建的模型进行验证, 临界磷浓

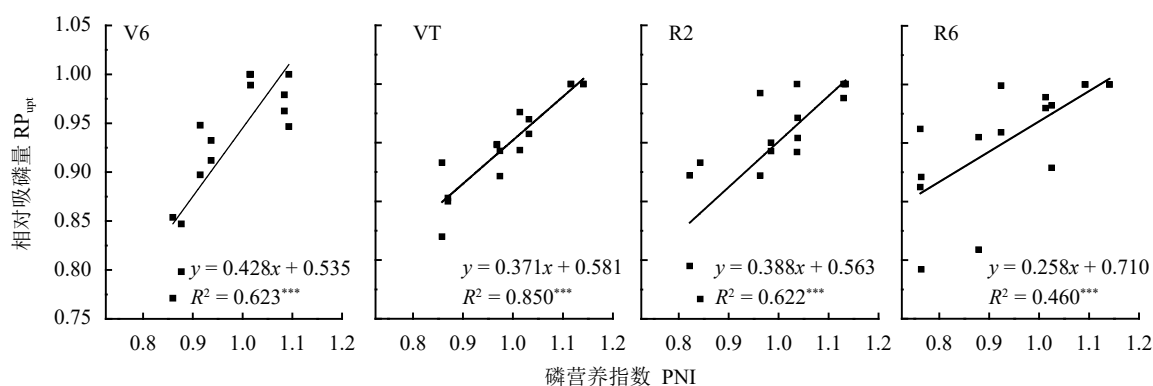


图 7 夏玉米磷营养指数与相对吸磷量的关系

Fig. 7 Relationship between phosphorus nutrition index (PNI) and relative P uptake (RP_{upt}) of summer maize

[注 (Note): V6—拔节期 Jointing stage; VT—抽雄期 Tasseling stage; R2—灌浆期 Filling stage; R6—成熟期 Maturity stage.]

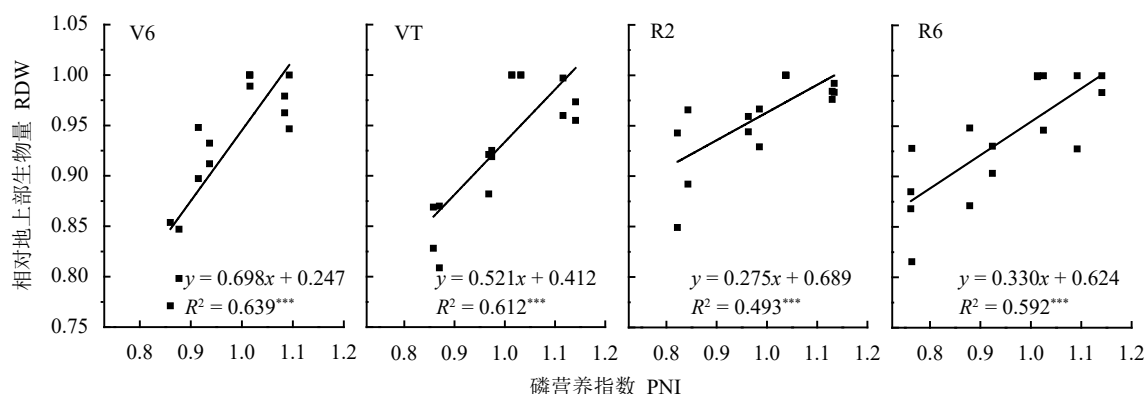


图 8 夏玉米磷营养指数与相对地上部生物量的关系

Fig. 8 Relationship between phosphorus nutrition index (PNI) and relative aboveground dry biomass (RDW) of summer maize

[注 (Note): V6—拔节期 Jointing stage; VT—抽雄期 Tasseling stage; R2—灌浆期 Filling stage; R6—成熟期 Maturity stage.]

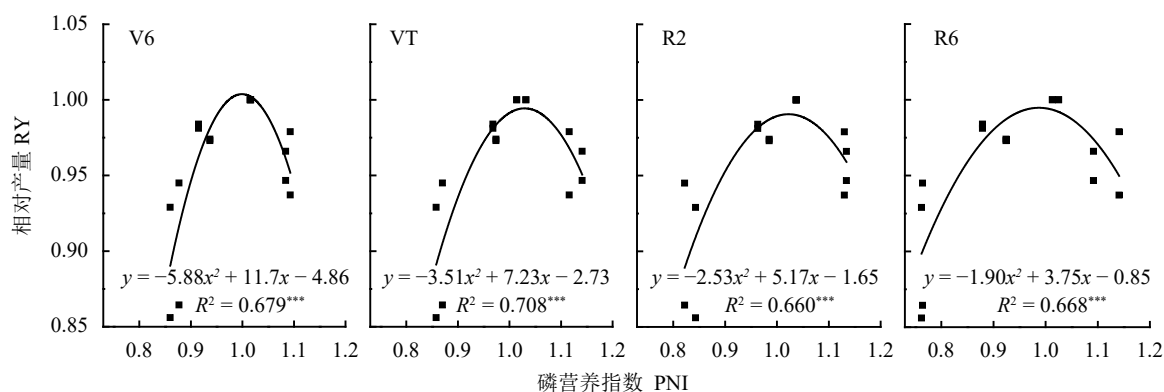


图 9 夏玉米磷营养指数与相对产量的关系

Fig. 9 Relationship between phosphorus nutrition index (PNI) and relative yield (RY) of summer maize

[注 (Note): V6—拔节期 Jointing stage; VT—抽雄期 Tasseling stage; R2—灌浆期 Filling stage; R6—成熟期 Maturity stage.]

度稀释模型的 $RMSE$ 和 $n-RMSE$ 值分别为 1.146 和 18.23%，从验证结果可知，基于地上部生物量的玉米临界磷浓度模型模拟效果较好，本研究建立的模型 $n-RMSE$ 与马铃薯、小麦、棉花等作物的临界磷浓

度稀释模型模拟效果相近，表明该模型可以作为玉米磷营养状况判断的工具之一。同时，考虑到品种差异产生的影响，利用郑单 958 试验数据构建模型，采用豫玉 22 试验数据对构建的模型进行验证，

发现模型中参数 a 和 b 基本未变, 可能是由于两个品种对磷素敏感程度相似, 所得模型普适性可能不足, 在今后研究中可以增加对磷素敏感性差异较大的玉米品种, 以便进一步验证和增强模型的普适性。

3.2 磷营养诊断和适宜施磷量

关于作物营养诊断和推荐施肥量的研究方法分为两类^[24], 一类是经验型模型(描述型、效应曲线预测); 另一类是机理型施肥模型, 即模拟模型。机理型施肥模型能通过模拟作物生长发育的营养过程, 估量作物对养分的需求量, 而经验型函数在描述施肥量与产量的相互关系上缺乏一定的生物学依据, 很难定量分析作物的肥料需求量。刘冰峰等^[25]通过高光谱遥感构建准确性高且稳定的夏玉米叶片含磷量预测拟合模型, 王磊等^[26]构建春玉米叶片磷素营养光谱诊断模型, 表明大喇叭口期是磷素营养的光谱响应敏感期。席雪琴等^[16]使用切里西指数模型和两段式线性模型, 确定塿土区高产土壤有效磷临界值及磷素淋溶阈值, 并提出当土壤有效磷含量低于 15 mg/kg 时, 夏玉米施磷量在 70~85 kg/hm² 以上。前者虽然通过光谱数据构建磷营养诊断模型, 但众多光谱特征参量分析过程较为复杂, 且在严重缺磷时叶片光谱分析才能用于磷营养诊断。后者根据经验型的函数对塿土磷素淋溶阈值进行分析, 未考虑植株生长过程中对肥料吸收利用的临界值。本研究基于临界磷浓度稀释模型推导的磷营养指数(PNI)模型, 既可以实时诊断作物不同生长阶段磷素营养状况, 还可以量化作物受磷素营养制约程度。加之模型参数易于获取, 计算方法简便, 故对玉米适宜施磷量的估计值较其他方法更为准确。

本研究通过计算不同施磷处理下的 PNI 值发现, 同一取样时期 PNI 值随施磷水平的提高而增加, PNI 与相对地上部生物量呈极显著正相关, 与庞保刚等^[13]在棉花中发现磷营养指数与相对地上部生物量呈现正相关结果相似, 说明基于临界磷稀释曲线模型的 PNI 来评价植株磷营养状况具有可靠性。施磷过量和不足都会对玉米产量产生较大影响^[27-28], 边秀芝等^[29]研究表明, 随磷肥施用量增加, 玉米的百粒重增加, 因而玉米籽粒产量提高。李强等^[30]研究指出, 玉米产量与穗粒数的相关性显著大于千粒重。本研究表明, 磷肥对玉米产量构成因素影响较大的首先是穗粒数, 其次为百粒重。在施氮基础上增施磷肥可提高玉米产量, 但玉米产量并未随施磷水平的提高持续增加, 呈现为先增后降的趋势。姚锦秋

等^[31]指出, 在一定磷肥施用范围(75~156 kg/hm²)内, 增加施磷量可以促进玉米植株的磷素吸收利用率, 进而提高产量, 但过量施磷肥增产效果不明显甚至减产。本研究表明, 当施磷量低于 120 kg/hm² 时, 夏玉米产量随施磷量的增加而增加, 施磷量达到 180 kg/hm² 会限制产量增加。地上部生物量在施磷量低于 120 kg/hm² 时, 随施磷水平的提高而增加, 超过此施磷量, 生物量增加不显著甚至略微减少。在对夏玉米的 PNI 分析中, 发现 P60 和 P120 相对其他处理的 PNI 值更接近 1, 但 P60 处理的玉米灌浆期以后 PNI 值下降快, 植株磷素亏缺严重, 不利于高产, 而施磷量为 120 kg/hm² 时, PNI 值各生育时期都在 1 附近, 植株磷营养适宜。当磷肥用量为 180 kg/hm² 时, PNI 值明显大于 1, 玉米植株表现为磷素盈余现象, 若磷素长期处于盈余状态, 不仅造成磷资源浪费, 还会增加土壤磷素向水体流失的风险, 导致水体富营养化加剧, 不利于农业的可持续发展。考虑到本研究设置的两个施磷量 60 和 120 kg/hm² 之间梯度过大, 且 P60 处理在拔节期至灌浆期 PNI 值相对接近 1, 仅在成熟期较低(图 6), 据此可以推断 P60 和 P120 处理的施磷量平均值 P90 可能为最适施磷量处理。当然, 在后期研究中可以增加 P90 处理, 以便对最佳施磷量的确定提供更好的依据。如果结合产量效应方程拟合(图 2)和磷营养指数诊断结果, 实际生产上夏玉米适宜施磷量在 90~110.2 kg/hm²。

4 结论

本研究依据 2019—2020 年两个不同品种玉米的试验资料建立并验证了夏玉米临界磷浓度稀释曲线模型, 确定了临界磷浓度与地上部最大生物量间的幂指数关系($P_c = 8.11DM^{0.22}$), 同时构建的最大、最小磷浓度稀释曲线亦符合幂指数关系, 稀释曲线模型的 RMSE 和 n-RMSE 分别为 1.146 和 18.23%, 说明模型有较好的稳定性。使用基于临界磷浓度稀释曲线模型构建的磷营养指数(PNI)对玉米植株磷营养状况进行诊断, PNI 随生育进程的推移呈先升高后下降趋势, PNI 与相对吸磷量(RP_{up})、相对干物质(RDW)和相对产量(RY)指标间存在极显著相关性, 说明 PNI 对夏玉米磷营养诊断和最佳施磷量指导具有可行性。

参 考 文 献:

- [1] 刘琳, 吉冰洁, 李若楠, 等. 陕西关中冬小麦/夏玉米区土壤磷素特

- 征[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(21): 3878–3889.
- Liu L, Ji B J, Li R N, *et al.* Characteristics of soil phosphorus in winter wheat/summer maize cropping in Shaanxi Guanzhong Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(21): 3878–3889.
- [2] Heuer S, Gaxiola R, Schilling R, *et al.* Improving phosphorus use efficiency: A complex trait with emerging opportunities[J]. *Plant Journal*, 2017, 90: 868–885.
- [3] 何萍, 金继运, 李文娟, 等. 施磷对高油玉米和普通玉米吸磷特性及品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(3): 538–543.
- He P, Jin J Y, Li W J, *et al.* Comparison of phosphorous absorption, quality and yield between high oil maize and common maize as influenced by phosphorous application[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(3): 538–543.
- [4] 刘凯, 张吉旺, 郭艳青, 等. 施磷量对高产夏玉米产量和磷素利用的影响[J]. *山东农业科学*, 2016, 48(4): 61–65.
- Liu K, Zhang J W, Guo Y Q, *et al.* Effects of phosphorus fertilization on yield and phosphorus use efficiency of high-yielding summer maize[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2016, 48(4): 61–65.
- [5] 彭正萍, 张家铜, 袁硕, 等. 不同供磷水平对玉米干物质和磷动态积累及分配的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(4): 793–798.
- Peng Z P, Zhang J T, Yuan S, *et al.* Effects of different phosphorus application rates on the dynamic accumulation and distribution of dry matter and phosphorus in maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(4): 793–798.
- [6] 范秀艳, 杨恒山, 高聚林, 等. 施磷方式对高产春玉米磷素吸收与磷肥利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 312–320.
- Fan X Y, Yang H S, Gao J L, *et al.* Effects of phosphorus fertilization methods on phosphorus absorption and utilization of high yield spring maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(2): 312–320.
- [7] 常艳丽, 刘俊梅, 李玉会, 等. 陕西关中平原小麦/玉米轮作体系施肥现状调查与评价[J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2014, 42(8): 51–61.
- Chang Y L, Liu J M, Li Y H, *et al.* Investigation and evaluation of fertilization under winter wheat and summer maize rotation system in Guanzhong Plain, Shaanxi Province[J]. *Journal of Northeast A & F University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(8): 51–61.
- [8] 谢亚萍, 李爱荣, 闫志利, 等. 不同供磷水平对胡麻磷素养分转运分配及其磷肥效率的影响[J]. *草业学报*, 2014, 23(1): 158–166.
- Xie Y P, Li A R, Yan Z L, *et al.* Effect of different phosphorus levels on phosphorus nutrient uptake, transformation and phosphorus utilization efficiency of oil flax[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(1): 158–166.
- [9] Zamuner E C, Lloveras J, Echeverria H E. Use of a critical phosphorus dilution curve to improve potato crop nutritional management[J]. *American Journal of Potato Research*, 2016, 93: 392–403.
- [10] Belanger G, Ziadi N. Phosphorus and nitrogen relationships during spring growth of an aging timothy sward[J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100: 1757–1762.
- [11] Gomes M I, Magnitskiy S, Rodriguez L E. Critical dilution curves for nitrogen, phosphorus, and potassium in potato group and igenum[J]. *Soil Fertility and Crop Nutrition*, 2019, 111: 419–427.
- [12] Belanger G, Ziadi N, Pageau D, *et al.* A model of critical phosphorus concentration in the shoot biomass of wheat[J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107: 963–970.
- [13] 庞保刚, 曹楠, 周治国, 赵文青. 不同磷敏感棉花品种临界磷浓度稀释模型与磷营养诊断[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(22): 4561–4570.
- Pang B G, Cao N, Zhou Z G, Zhao W Q. Critical phosphorus concentration dilution model and phosphorus nutrition diagnosis in two cotton cultivars with different phosphorus sensitivity[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(22): 4561–4570.
- [14] 史桂清, 石书亚, 赵颖佳, 肖凯. 氮磷钾施用方式对夏玉米植株、产量和土壤养分的影响[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(13): 23–30.
- Shi G Q, Shi S Y, Zhao Y J, Xiao K. NPK application modes affect plants and yield of summer maize and soil nutrients[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(13): 23–30.
- [15] 侯云鹏, 杨建, 孔丽丽, 等. 不同施磷水平对春玉米产量、养分吸收及转运的影响[J]. *玉米科学*, 2017, 25(3): 123–130.
- Hou Y P, Yang J, Kong L L, *et al.* Effect of different phosphorus levels on yield, nitrogen, phosphorus and potassium absorption and translocation of spring maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2017, 25(3): 123–130.
- [16] 席雪琴, 孙本华, 陈勇, 杨学云. 塿土区作物和土壤淋溶磷临界值研究及推荐施磷建议[J]. *中国土壤与肥料*, 2015, (6): 34–40.
- Xi X Q, Sun B H, Chen Y, Yang X Y. Research of phosphorus critical value for crop yield and soil leaching, and phosphorus fertilizer recommendation on an anthropogenic Loess soil area[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015, (6): 34–40.
- [17] 杨学云, 孙本华, 古巧珍, 等. 长期施肥对塿土磷素状况的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(4): 837–842.
- Yang X Y, Sun B H, Gu Q Z, *et al.* The effects of long term fertilization on soil phosphorus status in manural loessial soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(4): 837–842.
- [18] Willmott C J. Some comments on the evaluation of model performance[J]. *Bulletin American Meteorological Society*, 1982, 63: 1309–1369.
- [19] Yang J, Greenwood D J, Rowell D L, *et al.* Statistical methods for evaluating a crop nitrogen simulation model[J]. *Agricultural Systems*, 2000, 64: 37–53.
- [20] Jamieson P D, Porter J R, Wilson D R. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand[J]. *Field Crops Research*, 1991, 27: 337–350.
- [21] Kopittke P M, Hernandez-Soriano M C, Dalal R C, *et al.* Nitrogen-rich microbial products provide new organo-mineral associations for the stabilization of soil organic matter[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24: 1762–1770.
- [22] 陈远学, 李汉邯, 周涛, 等. 施磷对间套作玉米叶面积指数、干物质积累分配及磷肥利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(10): 2799–2806.
- Chen Y X, Li H H, Zhou T, *et al.* Effects of phosphorus fertilization on leaf area index, biomass accumulation and allocation, and phosphorus use efficiency of intercropped maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(10): 2799–2806.
- [23] 王兴强, 郭丽琢, 王红艳. 不同N、P、K配方施肥对玉米干物质积累及产量的影响[J]. *农业科技与信息*, 2019, (17): 30–32, 36.

- Wang X Q, Guo L Z, Wang H Y. Effect of different N, P, K fertilization on dry matter accumulation and yield of maize[J]. *Agricultural Science-Technology and Information*, 2019, (17): 30–32, 36.
- [24] 王兴仁, 陈新平, 张福锁, 毛达如. 施肥模型在我国推荐施肥中的应用[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(1): 67–74.
- Wang X R, Chen X P, Zhang F S, Mao D R. Application of fertilization model in recommended fertilization in our country[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 1998, 4(1): 67–74.
- [25] 刘冰峰, 李军, 贺佳. 玉米叶片全磷含量高光谱遥感监测诊断模型研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 252–258, 280.
- Liu B F, Li J, He J. Total phosphorus content estimation models of summer maize leaves based on hyperspectral remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(8): 252–258, 280.
- [26] 王磊, 白由路, 杨俐苹. 春玉米磷素营养的光谱响应及诊断[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(5): 802–808.
- Wang L, Bai Y L, Yang L P. Spectral response and diagnosis of phosphorus nutrition in corn[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2007, 13(5): 802–808.
- [27] 张立花, 张辉, 黄玉芳, 等. 施磷对玉米吸磷量、产量和土壤磷含量的影响及其相关性[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(7): 801–809.
- Zhang L H, Zhang H, Huang Y F, *et al.* Effect of phosphorus application on soil available phosphorus and maize phosphorus uptake and yield[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(7): 801–809.
- [28] 黄莹, 赵牧秋, 王永壮, 等. 长期不同施磷条件下玉米产量、养分吸收及土壤养分平衡状况[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(3): 694–701.
- Huang Y, Zhao M Q, Wang Y Z, *et al.* Corn yield, nutrient uptake and soil nutrient budget under different long-term phosphorus fertilization[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(3): 694–701.
- [29] 边秀芝, 郭金瑞, 阎孝贡, 等. 吉林中部玉米高产施肥模式研究[J]. *吉林农业科学*, 2008, 33(6): 41–43.
- Bian X Z, Guo J R, Yan X G, *et al.* Fertilization model of high yield of maize in middle Jilin Province[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2008, 33(6): 41–43.
- [30] 李强, 孔凡磊, 袁继超. 氮肥运筹对不同氮效率玉米品种干物质生产及产量的影响[J]. *华北农学报*, 2018, 33(6): 174–182.
- Li Q, Kong F L, Yuan J C. Effects of nitrogen fertilizer operation on dry matter production and yield of maize cultivars with contrasting nitrogen efficiency[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(6): 174–182.
- [31] 姚锦秋, 范富, 葛海峰, 等. 施肥对玉米产量构成因素的影响[J]. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 2010, 25(6): 648–652.
- Yao J Q, Fan F, Ge H F, *et al.* Effect of fertilization on yield traits in maize[J]. *Journal of Inner Mongolia University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2010, 25(6): 648–652.