

磷添加对高氮条件下入侵植物节节麦竞争能力的影响

王 宁^{1*}, 袁美丽², 陈 浩¹

(1. 河南科技大学园艺与植物保护学院, 河南 洛阳 471023; 2. 洛阳市国花园, 河南 洛阳 471001)

摘 要: 战略性肥料管理是综合杂草管理系统的重要组成部分, 而土壤中的 P 也是决定入侵植物生长和竞争优势的重要因素之一。通过盆栽控制试验, 探讨 P 添加对高 N 条件下入侵植物节节麦生长及竞争能力的影响, 旨在为冬小麦田的科学施肥提供参考。研究表明: (1) P 添加对高 N 条件下节节麦和小麦的生长发育及种间竞争均造成了一定的影响。高 N 条件下, 单种节节麦的株高、叶面积、分蘖数及总生物量均随着 P 添加量的增加而增加, 而依据上述指标的增幅可知, 节节麦对高 N 条件下 P 添加的响应能力大于小麦; 此外, 随着 P 添加量的增加, 节节麦的根冠比不断增加而叶根比则呈持续下降, 表明其通过增加对根部的投入以适应高 N 条件下土壤中 P 的变化, 而这也可能是由于 P 添加引起节节麦对 N 的高需求, 而试验中设置的高 N 条件不能满足其生长发育需要的结果。(2) 单种及混种条件下节节麦株高、叶面积等 7 项指标的可塑性指数均值分别为 0.31、0.48, 明显大于小麦的 0.25、0.43, 由此表明, 节节麦以相对较高的可塑性适应高 N 条件下土壤中 P 的变化。(3) 不同 P 添加处理中节节麦的竞争平衡指数值均大于 0, 并呈逐渐增大的变化, 这表明高 N 条件下 P 添加提高了节节麦对小麦的竞争抑制作用。综上所述, 在当下冬小麦田土壤中含 N 量日益增加的背景下, 不科学的 P 肥管理可能会进一步加剧节节麦对小麦的竞争危害。

关键词: 入侵植物; 磷添加; 竞争能力; 节节麦

有效的肥料管理是综合杂草管理系统的重要组成部分^[1]。虽然氮 (N) 通常是作物产量增加的主要养分, 但磷 (P) 也已被广泛用于改善作物生产及产量^[2]。诸多研究表明, 随着大气 N 沉积的逐渐增加, 使得养分限制逐渐从 N 转移至 P 或其它矿物元素^[3-4]。此外, 许多杂草会对 P 产生积极反应^[5-6], 不科学的施用 P 肥可能会对作物与杂草竞争产生不利的影响。但通常对作物施肥的建议却很少会考虑到增加的养分可能会改变作物、杂草的竞争关系, 甚至会促进杂草的生长。因此, 战略性土壤 P 肥管理的目标是在促进作物生长的同时而不增加或减少杂草的生长。此外, 资源比例假说是外来植物成功入侵的重要机制之一^[7], 而土壤中资源可用性的改变可能会改变入侵植物的竞争能力。

节节麦 (*Aegilops tauschii* Coss.) 为世界十大恶性杂草之一, 主要分布于南欧的地中海沿岸及非洲

北部等地^[8]。如今, 节节麦已至少入侵至中国的山西、河北、河南等 10 余个小麦 (*Triticum aestivum* L.) 主产省^[9]。作为小麦野生近缘种, 节节麦在生长习性、出苗时间及苗期形态特征等方面均与小麦极其接近, 不仅与小麦激烈竞争光照、水及肥等资源, 且又是小麦条锈病的替代宿主, 因此极易造成小麦减产甚至绝收。因与小麦为近亲, 截至目前已注册用于小麦的除草剂对节节麦的效果均不明显, 这也直接导致了我国冬小麦产区的节节麦依然靠人工拔除为主^[10]。本课题组的前期研究表明, 大气 N 沉降的增加会促进节节麦对小麦的竞争危害^[11]。但至今有关土壤中 P 对节节麦生长及竞争能力影响的研究尚未见报道。因此, 本研究以冬小麦为伴生植物, 探讨高 N 条件下 P 添加对节节麦入侵及竞争能力的影响, 旨在为冬小麦田的科学施肥及节节麦的田间管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料节节麦及冬小麦 (‘新麦 32’) 种子均于 2020 年 6 月采自河南省新乡农业科学院试验田 (35° 18' N, 113° 52' E), 晒干后室内保存。试验在河南科技大学科教试验园区内进行, 研究区域

收稿日期: 2021-10-28 ; 录用日期: 2021-12-31

基金项目: 河南省自然科学基金项目 (182300410092); 洛阳市公益性行业科研专项 (2202022A)。

作者简介: 王宁 (1979-), 讲师, 博士, 主要从事外来植物入侵机理研究。E-mail: 9903899@haust.edu.cn。同为通讯作者。

位于河南省洛阳市洛龙区 (34° 59' N, 112° 16' E)。试验所用土壤为褐土, 来源于周边农田, 基础理化性状为: pH 值 7.4, 有机质含量为 14.23 g · kg⁻¹, 有效 P 11.4 mg · kg⁻¹, 全 N 0.85 g · kg⁻¹, 有效 K 167.5 mg · kg⁻¹。

1.2 试验设计

2020 年 9 月, 将经过筛选的节节麦及小麦种子播种至种植箱内, 基质为珍珠岩: 蛭石: 草炭为 1:1:1。待幼苗生长至“两叶一心”时, 选取高度及长势基本一致的节节麦和小麦幼苗, 按设计要求进行种植, 每盆所用土量保持一致。种植前首先测定土壤的含水量及田间最大持水量, 种植后记录每盆重量。运用取代试验方法^[12], 设置节节麦和小麦单种及等比例混种。结合小麦常用种植密度 (150 ~ 200 株 · m⁻²) 及盆规格 (盆上口直径 30 cm, 高 25 cm), 并考虑边缘效应后设定为 12 株 · 盆⁻¹, 单种及混种密度相同。

依据河南地区冬小麦田施肥情况^[13], 并结合所用土壤中 N、P 含量, P 添加分别设置 0 (CK)、90、180 kg · hm⁻² 3 个水平, 并设置高 N 条件为 275 kg · hm⁻²。此外, K 肥用量为 180 kg · hm⁻²。N 肥、P 肥和 K 肥分别选用尿素、过磷酸钙和氯化钾。其中 N 肥采用基肥和追肥 1:1 的形式施用, 而 P、K 肥则作为基肥一次性施入。其中, 追肥施用的 N 是在试验中期 (即幼苗生长 60 d 时) 采用溶入去离子水, 结合灌水浇入盆内。每处理 10 盆, 盆底放置托盘。移植后缓苗一周, 随后进入正常管理, 依据每盆的重量及田间最大持水量进行浇水, 保证盆土含水量为土壤田间最大持水量的 75% ~ 80%。并定期将托盘中的水分倒回盆内, 防止浇水造成土壤养分的淋失。试验在塑料拱棚内进行, 雨天覆塑料膜, 晴天拆除。

1.3 测定指标及方法

生长 120 d 后结束试验, 每处理随机选取 10 株幼苗进行相关指标的测定。首先测量株高, 随后用水冲刷的方法将植株根部从土壤中小心分离出来, 并尽量减少细根的损失。收获全株后, 随即将地上部 (叶、茎) 和地下部 (根) 分开。叶面积采用扫描仪及 Photoshop 进行测定^[14]。随后将植株叶、茎、根分别装入纸袋, 70℃烘箱中烘干至恒重, 万分之一天平称重测定每株幼苗不同部位的生物量。

1.4 数据处理

采用相对产量 (RY)、相对产量总和 (RYT)

及竞争平衡指数 (CB) 测定节节麦与小麦间的竞争能力强弱^[12, 15]。具体公式如下:

$$RY_a = Y_{ab} / Y_a$$

$$RYT = (RY_a + RY_b) / 2$$

$$CB_a = \ln RY_a / RY_b$$

式中, a、b 分别代表节节麦和小麦 2 个供试物种; Y_a 代表单种时 a 的单株产量; RY_a 、 RY_b 分别代表混种时 a、b 的相对产量; Y_{ab} 为混种时 a 的单株产量。计算时单株产量为单个植株的干物质量。

$RY_a = 1.0$, 表明 a 与 b 的种内及种间竞争强度相同, 即 2 个物种的竞争能力相同; $RY_a > 1.0$, 表明种内竞争能力大于种间, 即 a 对 b 的竞争能力大于其对自身的竞争强度; $RY_a < 1.0$, 表明种内竞争能力小于种间, 即 a 对 b 的竞争能力小于对其自身的竞争强度。

$RYT = 1.0$, 表明 a 与 b 需要相同的营养资源, 且一种物种可以通过竞争作用将另一物种排除出去; $RYT > 1.0$, 表明 a 与 b 不存在竞争作用; $RYT < 1.0$, 表明 a 与 b 存在竞争作用。

$CB_a = 0$, 表明 a 和 b 的竞争能力相等; $CB_a < 0$, 表明 a 的竞争能力小于 b; $CB_a > 0$, 表明 a 的竞争能力大于 b, CB_a 值越大, 表明 a 的竞争能力越强。

此外, 可塑性指数 (PPI) = (某一指标在不同 P 添加处理中的最大值 - 最小值) / 最大值。PPI 的大小表示 P 添加对某一指标表型可塑性影响作用的大小^[13]。根冠比^[16] (R/C) = 根生物量 / 地上部生物量; 叶根比^[16] ($LARMR$) = 叶总面积 / 总根重。

1.5 数据分析

利用 SPSS 19.0 进行统计分析, 应用 Duncan 新复极差法进行差异显著性检验。用 Excel 2010 进行数据整理, 并绘图。

2 结果与分析

2.1 高 N 条件下 P 添加对节节麦和小麦幼苗生长发育及表型可塑性的影响

随着 P 添加量增加, 高 N 条件下单种及混种中节节麦和小麦的株高均呈持续增加的变化趋势 (图 1)。其中, 当 P 添加量达到 180 kg · hm⁻² 时, 单种及混种条件下节节麦和小麦的株高分别较 CK 增加了 10.77%、23.35% 和 9.22%、19.09%, 但均未达到差异显著水平。此外, 虽然相同条件下 (种植模式 +P 添加量) 节节麦的株高均明显小于小麦。但从增幅可以看出, P 添加对节节麦株高的生长尤其是混种模式中的促进作用明显大于小麦。

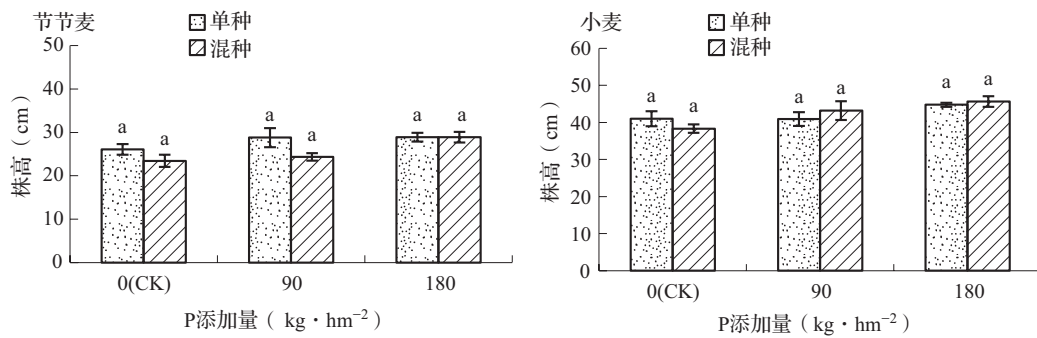


图1 高 N 条件下 P 添加对节节麦和小麦株高的影响

注: 数值为平均值 $\pm$ SE。图柱上方的不同字母表示在同一种植模式下 P 添加处理间显著差异 ($P<0.05$)。下同。

无论是单种还是混种, 节节麦和小麦叶面积同样随 P 添加量的增加均呈逐渐增大的变化趋势 (图 2)。其中, 单种及混种节节麦和小麦的叶面积均在 P 添加量达到 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时较 CK 增加达到显著水平 ($P<0.05$), 并分别较 CK 增加了 46.85%、

98.60% 和 25.82%、86.83%。虽然相同条件下 (种植模式 + P 添加量) 节节麦的叶面积均小于小麦, 但从其增幅可以看出, 高 N 条件下 P 添加对节节麦叶面积的增加尤其是混种条件下的促进作用明显大于小麦。

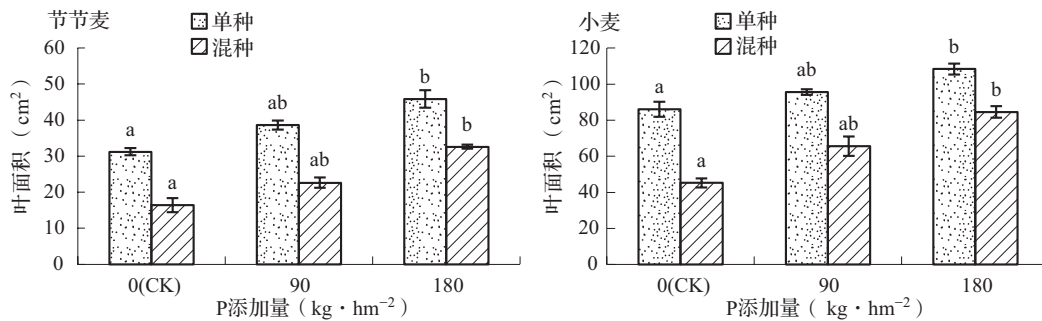


图2 高 N 条件下 P 添加对节节麦和小麦叶面积的影响

高 N 条件下, 不同种植模式中节节麦和小麦的分蘖数均随 P 添加量的增加呈逐渐增加的变化趋势 (图 3)。其中, 当 P 添加量达到 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 单种及混种条件下节节麦和小麦的分蘖数分别较 CK 增加了 17.33%、63.64% 和 16.67%、50.00%,

但均未达到差异显著水平。从增幅可以看出, 无论是单种还是混种, P 添加对高 N 条件下节节麦分蘖的促进作用均明显大于小麦。此外, 同等条件下 (种植模式 + P 添加量) 节节麦的分蘖数均明显大于小麦。

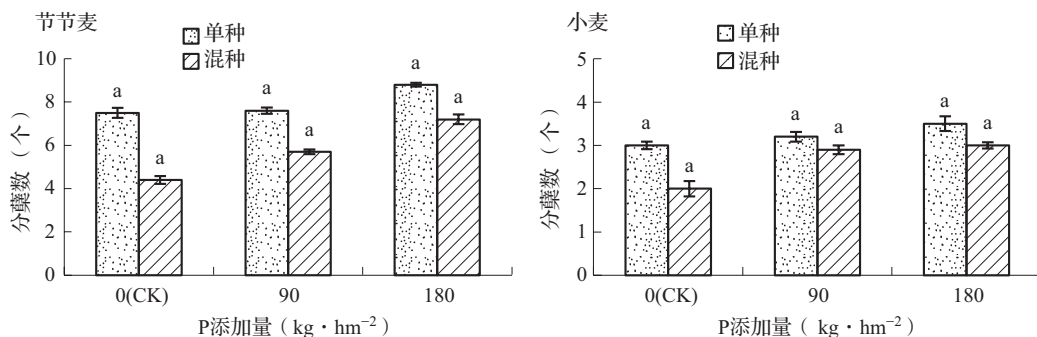


图3 高 N 条件下 P 添加对节节麦和小麦分蘖数的影响

高 N 条件下, 不同种植模式中节节麦和小麦的总生物量均随 P 添加量的增加逐渐增加 (图 4)。其中, 当 P 添加量达到 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 单种及混种条件下节节麦和小麦的总生物量分别较 CK 增加了 64.97%、132.43% 和 42.68%、98.00%, 且均达到

差异显著水平 ($P < 0.05$)。此外, 从增幅可以看出, P 添加对节节麦生物量积累的促进作用明显大于小麦, 其中又以对混种条件下节节麦的促进作用最为明显。

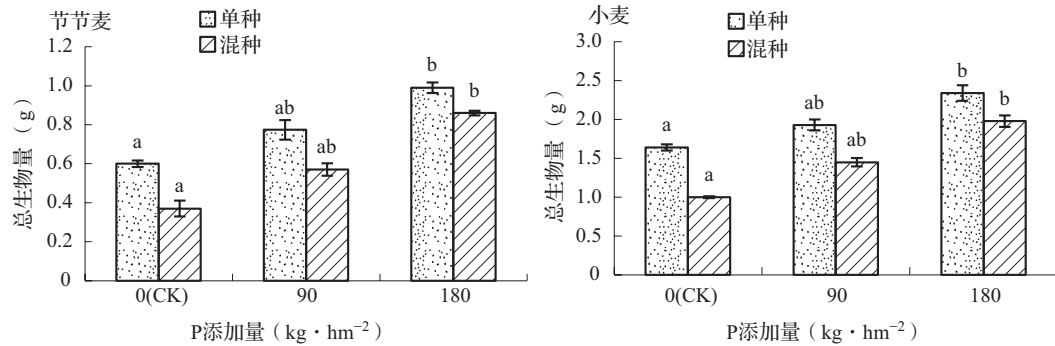


图 4 高 N 条件下 P 添加对节节麦和小麦总生物量的影响

高 N 条件下, 无论是单种还是混种, 随着 P 添加量的增加节节麦和小麦的 R/C 均呈逐渐升高的变化趋势, 而 LARMR 则呈不断下降的变化趋势 (图 5)。其中, 至 P 添加量达到 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 节节麦和小麦的 R/C 分别较 CK 增加了 29.87%、5.39% 和 37.13%、18.29%, 但均未达到差异显著水

平。从增幅可以看出, P 添加对小麦尤其是单种条件下小麦 R/C 的促进作用最大。至 P 添加量达到 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 单种及混种中节节麦和小麦的 LARMR 分别较 CK 下降了 26.58%、18.22% 和 34.09%、18.77%。从降幅可以看出, P 添加对小麦尤其是单种条件下小麦 LARMR 的抑制作用最为明显。

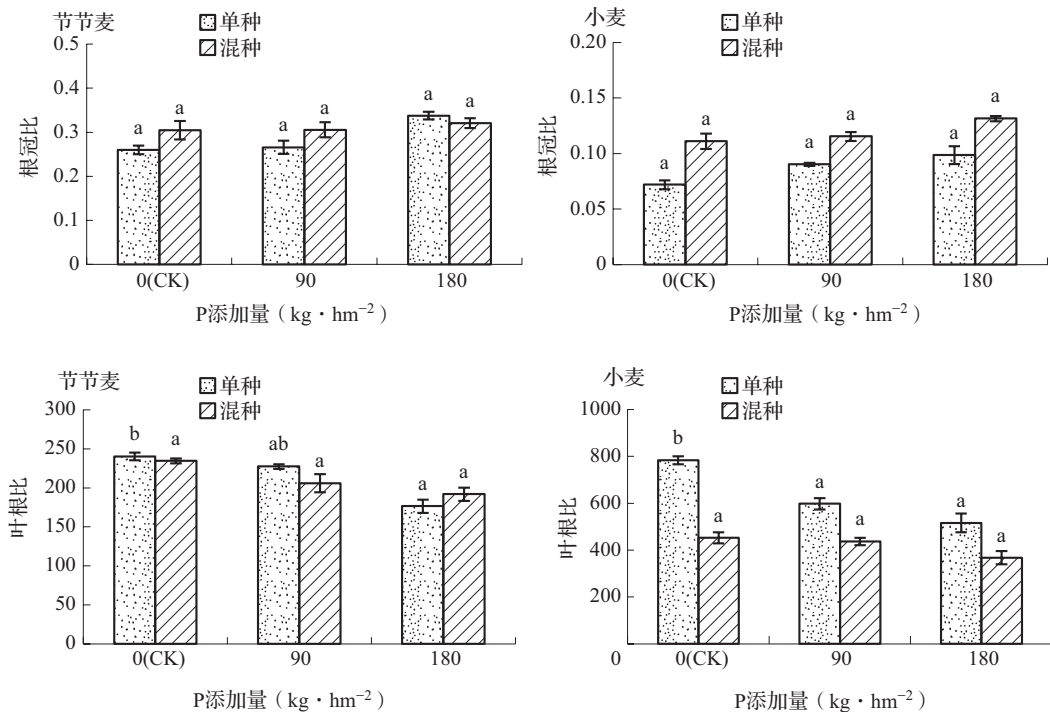


图 5 高 N 条件下 P 添加对节节麦和小麦根冠比及叶根比的影响

高 N 条件下, 无论是单种还是混种, 不同 P 添加处理后节节麦的株高、叶面积、分蘖数和根、茎、叶及总生物量的可塑性指数均高于小麦 (表 1)。此外, 无论是单种还是混种, 节节麦和小麦又均以根生物量的表型可塑性指数最大。单种及混种条件下节节麦上述 7 项指标的表型可塑性指数均值分别为 0.31、0.48, 明显大于小麦的 0.25、0.43。

表 1 高 N 条件下 P 添加对节节麦和小麦各生长参数表型可塑性指数的影响

变量	节节麦		小麦	
	单种	混种	单种	混种
株高	0.10	0.19	0.08	0.16
叶面积	0.32	0.50	0.21	0.46
分蘖数	0.15	0.39	0.14	0.33
总生物量	0.39	0.57	0.30	0.49
叶生物量	0.38	0.55	0.30	0.44
茎生物量	0.31	0.58	0.26	0.53
根生物量	0.50	0.59	0.48	0.57
均值	0.31	0.48	0.25	0.43

2.2 高 N 条件下 P 添加对节节麦与小麦竞争关系的影响

高 N 条件下, 不同 P 添加处理中节节麦和小麦的 RYT 及 RY 均小于 1 (表 2)。此外, 节节麦的 CB 值大于 0, 且随 P 添加量的增加而逐渐增大。

表 2 高 N 条件下 P 添加对节节麦和小麦相对产量、相对总产量和竞争平衡指数的影响

P 添加量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	相对产量 _a	相对产量
0 (CK)	$0.61 \pm 0.03\text{a}$	$0.62 \pm 0.04\text{a}$
90	$0.73 \pm 0.01\text{a}$	$0.74 \pm 0.01\text{a}$
180	$0.85 \pm 0.02\text{a}$	$0.87 \pm 0.02\text{a}$
P 添加量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	相对总产量	竞争平衡指数 _a
0 (CK)	$0.99 \pm 0.01\text{a}$	$0.01 \pm 0.01\text{a}$
90	$0.99 \pm 0.03\text{a}$	$0.02 \pm 0.02\text{a}$
180	$0.97 \pm 0.03\text{a}$	$0.03 \pm 0.01\text{a}$

注: 数值为平均值 $\pm$ SE。同列的不同字母表示在不同 P 添加量下显著差异 ($P < 0.05$)。

3 讨论

作为关键的非生物资源之一, P 可直接影响代谢过程并改变生态系统中的竞争关系, 从而在生物化学及生理生态学层面影响植物^[17]。土壤中 P 可

利用性的改变可以影响个体竞争力、物种多样性及生态系统的机构和功能等^[18]。而植物则可以通过改变生物量分配^[19]、生长发育过程中形态或生理适应性及耐受性^[20]等来应对 P 的限制。本研究结果表明, P 添加对高 N 条件下节节麦和小麦幼苗的生长发育及种间竞争关系均造成了一定的影响, 而这也必然会改变节节麦对小麦的竞争危害。

3.1 高 N 条件下 P 添加对节节麦和小麦生长发育及表型可塑性的影响

株高和叶面积是决定植物个体间光照资源竞争成功的关键因素^[21]。因对环境变化敏感且可塑性强, 株高等形态指标又与植物生长发育密切相关, 因此作为评价指标常被广泛应用于植物对环境变化的响应研究。叶面积的增加有利于植物形成致密的冠层空间, 植物光合作用的吸收面积得以扩大, 从而保障了植物光合生产能力及生物量的形成^[22]。本研究中, 无论是单种还是混种, 节节麦和小麦的株高、叶面积均随 P 添加的增加呈不断增加的变化趋势, 这表明 P 添加促进了高 N 条件下 2 种植物株高及叶面积的增长。而这也与高 N 条件下 P 添加对入侵植物加拿大一枝黄花 (*Solidago canadensis*) 及非入侵植物多裂翅果菊 (*Pterocypsela laciniata*) 的研究结果一致^[23]。此外, 从株高及叶面积增幅可以看出, 高 N 条件下 P 添加对节节麦的促进作用明显大于小麦, 而这可能与节节麦对土壤中 P 变化的反应较敏感有关。

作为植物的固有特性之一, 分蘖芽的分化通常不会受外界环境因素的影响, 然而分蘖芽是否会发育成为分蘖则与环境因素密切相关^[24]。本研究发现, 高 N 条件下 P 添加促进了节节麦和小麦分蘖数的增加, 其中又以单种条件下节节麦分蘖数的增幅最大, 且同等条件 (种植模式 + P 添加量) 的处理中, 节节麦的分蘖数明显高于小麦。此结果与房锋^[10]的研究结论相符, 即节节麦的分蘖能力与水肥条件及密度等密切相关, 且通常情况下大于小麦。此外, 此结果也证实了节节麦具有分蘖能力强、繁殖系数高的特性, 而这也正是节节麦得以快速蔓延并对小麦造成竞争危害的重要原因之一。

在养分有限的条件下, 植物会通过增加 R/C 的形式增加对根部的投入, 从而更有效地捕获限制性的土壤养分, 尤其是那些不太容易移动的养分, 如 P 等^[19, 25]; 而养分充足时, 植物则会通

过增加叶面积等形式将更多的生物量分配于碳同化器官^[19, 26]。总之, 改变生物量分配被广泛认为是植物应对可变生境的重要策略^[27]。本研究中, 随着 P 添加量的增加, 节节麦和小麦的 R/C 均不断增加, 而 LARMR 则呈不断下降的变化趋势。由此表明, 节节麦和小麦均通过增加对根部的投入以适应高 N 条件下 P 添加后土壤中养分的变化。已有的研究表明, P 供应的增加会引起植物对生物 N 的高需求^[28], 反之则亦然^[29]。而植物可通过调整对 N 和 P 的获取, 使得 N:P 更接近其生长所需的比率^[30]。然而, 如果增加的 P 供应产生了比预期更低的 N:P^[31], 超过了液泡储存能力的进一步积累即可造成营养失衡^[32], 甚至会抑制生物量生产^[33]。本研究中, P 添加促使了节节麦和小麦对根部生物量的投入, 这可能是由于 P 添加后引起了 2 种植物对 N 的高需求, 而试验中设定的 275 kg·hm² 高 N 条件不能满足节节麦和小麦生长发育需要的结果。

表型可塑性是决定植物竞争能力及适合度的重要因子之一^[34]。Davidson 等^[35]认为, 入侵物种通常比共同出现的非入侵物种具有更大的表型可塑性。而具有高表型可塑性的植物通常具有更强的攻击性, 并会占据更广阔的区域^[36]。本研究中, 混种条件下节节麦的株高、叶面积等 7 项指标的可塑性指数均高于小麦, 且均值也明显大于小麦。而这也与增施 N 对节节麦竞争能力影响^[37]的研究中, 其表型可塑性明显大于小麦的结论相符。

3.2 高 N 条件下 P 添加对节节麦与小麦竞争关系的影响

N 和 P 的可用性, 在营养水平 (N、P 含量) 及 N:P 方面, 不仅影响植物的生长发育, 也会影响入侵生境中的种间竞争^[38]。正确选择竞争指标对解释植物间的竞争结果至关重要^[39]。生物量是衡量种间竞争的重要指标之一, 因此, 多数竞争指标均依据混种条件下的植物生物量情况来反映某种植物的竞争能力^[40]。本研究中, 不同 P 添加处理中, 节节麦和小麦的 RY 均始终小于 1, 表明无论是节节麦还是小麦, 其种内竞争均明显小于二者的种间竞争。从小麦的 CB 可知, 节节麦的竞争能力大于小麦, 并随 P 添加量的增加呈逐渐增大的变化趋势。而结果与 Blackshaw 等^[41]的研究结论一致, 即对 P 反应较敏感的地肤 (*Kochia scoparia* L.), 其竞争力随 P 添加的增加而增大。已有的研究表明,

当养分水平的增加增强了入侵植物的竞争优势, 并同时降低非入侵植物的竞争能力时, 必然会加剧对本土物种的竞争, 最终促进入侵物种的传播^[42]。

4 结论

本研究认为, 节节麦和小麦均能通过形态结构及生物量分配格局的调整, 对高 N 条件下土壤 P 添加做出一定的可塑性反应, 其中又以节节麦的表型可塑性较强。此外, 高 N 条件下 P 添加促进了节节麦对小麦的竞争抑制作用, 而这也可能是当下农田土壤含 N 量持续增加的大背景下不科学的 P 肥管理必然会加剧节节麦入侵危害的重要原因之一。最后, 本研究只是采用以基肥的方式进行了土壤 P 添加处理的研究, 实际生产中则包括土壤表面撒施、穴施等多种形式。此外, 试验设计的混种模式中采用了替代设计, 而有关该方法的局限性也早已受到广泛讨论, 其结果的推断很可能会受到密度及大小分布的限制。

参考文献:

- [1] Blackshaw R E, Anderson R L, Lemerle D. Cultural weed management [M]// Non-chemical weed management: principles, concepts and technology. Wallingford, UK: CAB International, 2007. 35-48.
- [2] Grant C A, Peterson G A, Campbell C A. Nutrient considerations for diversified cropping systems in the northern great plains [J]. Agronomy Journal, 2002, 94 (2): 186-198.
- [3] Gordon C, Wynn J M, Woodin S J. Impacts of increased nitrogen supply on high Arctic heath: the importance of bryophytes and phosphorus availability [J]. New Phytologist, 2001, 149 (3): 461-471.
- [4] Falkengren-Grerup U, Diekmann M. Use of a gradient of N-deposition to calculate effect-related soil and vegetation measures in deciduous forests [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 180: 113-124.
- [5] Blackshaw R E, Molnar L. Phosphorus fertilizer application method affects weed growth and competition with wheat [J]. Weed Science, 2009, 57 (3): 311-318.
- [6] Blackshaw R E, Brandt R N, Janzen H H, et al. Weed species response to phosphorus fertilization [J]. Weed Science, 2004, 52 (3): 406-412.
- [7] Harpole W S. Resource-ratio theory and the control of invasive plants [J]. Plant and Soil, 2006, 280 (1): 23-27.
- [8] Lubbers E L, Gill K S, Cox T S, et al. Variation of molecular markers among geographically diverse accessions of *Triticum tauschii* [J]. Genome, 1991, 34 (3): 354-361.
- [9] 张朝贤, 李香菊, 黄红娟, 等. 警惕麦田恶性杂草节节麦蔓

- 延危害[J]. 植物保护学报, 2007, 34(1): 103-106.
- [10] 房锋. 节节麦 (*Aegilops tauschii* Coss.) 生态适应性[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [11] Wang N, Chen H. Increased nitrogen deposition increased the competitive effects of the invasive plant *Aegilops tauschii* on wheat [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2019, 41(10): 176.
- [12] de Wit C T. On competition [M]. Wageningen: Netherlands Press, 1960.
- [13] 杨亚东, 张明才, 胡君蔚, 等. 施氮肥对华北平原土壤氨氧化细菌和古菌数量及群落结构的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(11): 3636-3646.
- [14] 肖强, 叶文景, 朱珠, 等. 利用数码相机和Photoshop 软件非破坏性测定叶面积的简便方法[J]. 生态学杂志, 2005, 24(6): 711-714
- [15] Fowler N. Competition and coexistence in a North Carolina grassland II. effects of the experimental removal of species [J]. *The Journal of Ecology*, 1981, 69(3): 843-854.
- [16] 王俊峰, 冯玉龙. 光强对两种入侵植物生物量分配、叶片形态和相对生长速率的影响[J]. 植物生态学报, 2004, 28(6): 781-786.
- [17] Williamson L C, Ribrioux S P, Fitter AH, et al. Phosphate availability regulates root system architecture in *Arabidopsis* [J]. *Plant Physiology*, 2001, 126(2): 875-882.
- [18] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude [J]. *Proceedings of the National Academy of Science of the United State of America*, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [19] Shipley B, Meziane D. The balanced-growth hypothesis and the allometry of leaf and root biomass allocation [J]. *Functional Ecology*, 2002, 16(3): 326-331.
- [20] Gedroc J J, McConnaughay K D M, Coleman J S. Plasticity in root/stem partitioning: optimal, ontogenetic, or both? [J]. *Functional Ecology*, 1996, 10: 44-50.
- [21] Gorchov D L, Trisel D E. Competitive effects of the invasive shrub, *Lonicera maackii* (Rupr.) Herder (Caprifoliaceae), on the growth and survival of native tree seedlings [J]. *Plant Ecology*, 2003, 166(1): 13-24.
- [22] 全国明, 谢俊芳, 章家恩, 等. 氮、磷养分对飞机草营养器官表型可塑性的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2625-2632.
- [23] Wan L Y, Qi S S, Zou C B. et al. Phosphorus addition reduces the competitive ability of the invasive weed *Solidago canadensis* under high nitrogen conditions [J]. *Flora*, 2018, 240: 68-75.
- [24] 彭恒, 桂富荣, 李正跃, 等. 白茅对紫茎泽兰的竞争效应[J]. 生态学杂志, 2010, 29(10): 1931-1936.
- [25] Portsmouth A, Niinemets Ü. Structural and physiological plasticity to light and nutrients in five temperate deciduous woody species of contrasting shade tolerance [J]. *Functional Ecology*, 2007, 21(1): 61-77.
- [26] Aikio S, Markkola A M. Optimality and phenotypic plasticity of shoot-to-root ratio under variable light and nutrient availability [J]. *Evolutionary Ecology*, 2002, 16(1): 67-76.
- [27] Chapin III F S. The mineral nutrition of wild plants [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1980, 11(1): 233-260.
- [28] Hills E J, Sailsberry R L, Ulrich A. et al. Effect of phosphorus on nitrate in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) [J]. *Agronomy Journal*, 1970, 62(1): 91-92.
- [29] Thien S J, McFee W W. Effect of nitrogen on phosphorus transport systems in *Zea mays* L. [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1972, 36(4): 617-620.
- [30] Bloom A J, Chapin III F S, Mooney H A. Resource limitation in plants: an economic analogy [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1985, 16(1): 363-392.
- [31] Matzek V, Vitousek P M. N : P stoichiometry and protein: RNA ratios in vascular plants: an evaluation of the growth-rate hypothesis [J]. *Ecology Letters*, 2009, 12(8): 765-771.
- [32] Ryan M H, Ehrenberg S, Bennett R G, et al. Putting the P in *Pinus*: a phosphorus-accumulating herb native to Australia [J]. *Annals of Botany*, 2009, 103(6): 901-911.
- [33] Fujita Y, de Ruiter P C, Wassen M J, et al. Time-dependent, species-specific effects of N : P stoichiometry on grassland plant growth [J]. *Plant and Soil*, 2010, 334: 99-112.
- [34] Sultan S E. Phenotypic plasticity and plant adaptation [J]. *Plant Biology*, 1995, 44(4): 363-383.
- [35] Davidson A M, Jennions M, Nicotra A B. Do invasive species show higher phenotypic plasticity than native species and, if so, is it adaptive? A meta-analysis [J]. *Ecology Letters*, 2011, 14(4): 419-431.
- [36] Huey R B, Gilchrist G W, Carlson M L, et al. Rapid evolution of a geographic cline in size in an introduced fly [J]. *Science*, 2000, 287: 308-309.
- [37] 王宁, 袁美丽, 陈浩. 增施氮肥对节节麦与小麦苗期竞争的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(5): 57-63.
- [38] Güsewell S, Bollens U. Composition of plant species mixtures grown at various N : P ratios and levels of nutrient supply [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2003, 4(5): 453-466.
- [39] Weigelt A, Jolliffe P. Indices of plant competition [J]. *Journal of Ecology*, 2010, 91(5): 707-720.
- [40] Gibson D J, Connolly J, Hartnett D C, et al. Designs for greenhouse studies of interactions between plants [J]. *Journal of Ecology*, 1999, 87(1): 1-16.
- [41] Blackshaw R E, Brandt R N. Phosphorus fertilizer effects on the competition between wheat and several weed species [J]. *Weed Biology & Management*, 2009, 9(1): 46-53.
- [42] Holdredge C, Bertness M D, von Wettberg E, et al. Nutrient enrichment enhances hidden differences in phenotype to drive a cryptic plant invasion [J]. *Oikos*, 2010, 119(1): 1776-1784.

Effect of phosphorus addition on the competitive ability of *Aegilops tauschii* under high nitrogen conditions

WANG Ning^{1*}, YUAN Mei-li², CHEN Hao¹ (1. College of Horticulture and Plant Protection, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471023; 2. National Garden of Luoyang, Luoyang Henan 471001)

Abstract: Strategic fertilizer management is an important component of integrated weed management systems, and the P in the soil is one of the most important factors determining the growth and competitive advantage of invasive plants. A controlled trial in pots was conducted to investigate the effect of P addition on the growth and competitive ability of the invasive plant *Aegilops tauschii* under high N conditions. The results showed that: (1) P addition caused some effects on the growth and competition of both *Aegilops tauschii* and wheat under high N conditions. The plant height, leaf area, tiller number and total biomass of *Aegilops tauschii* in the monoculture model showed a increasing trend with the increase of P addition under high N conditions. Based on the increase of the above indicators, the responsiveness of *Aegilops tauschii* to P addition under high N conditions was greater than that of wheat. The root to crown ratio of *Aegilops tauschii* increased while the leaf area root mass ratio showed a continuous decrease with the increase of P addition, and this indicated that it adapted to the change of P addition under high N conditions by increasing the input to the roots, and this may be the result of the high demand for N in *Aegilops tauschii* caused by P addition, and the high N conditions in the experiment could not meet its growth and development needs. (2) The mean plasticity indices of seven indicators including plant height, leaf area and others seven indicators of *Aegilops tauschii* were 0.31 and 0.48 for the monoculture model and mixed-culture treatments, which were significantly higher than those of 0.25 and 0.43 in wheat, respectively, and this suggests that *Aegilops tauschii* adapts with relatively high plasticity to changes in P addition under high N conditions. (3) The competitive balance value of *Aegilops tauschii* was greater than 0 and showed a gradual increase, and this suggests that P addition under high N conditions increased the competitive inhibition of wheat by *Aegilops tauschii*. In summary, unscientific phosphorus fertilizer management may further exacerbate the competitive harm of *Aegilops tauschii* to wheat in the context of the increasing N content in soils of winter wheat fields at present.

Key words: invasive plants; phosphorus addition; competitive ability; *Aegilops tauschii*