

网络出版时间:2017-06-07

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1359.S.20170607.1005.028.html

干旱胁迫下氮素对不同基因型小麦根系活力和生长的调控

王秀波,上官周平

(中国科学院水利部水土保持研究所/黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨陵 712100)

摘要:为了探讨不同水氮耦合处理对小麦根系活力和吸收氮素能力的影响,以多穗型小麦品种西农979和大穗型小麦品种2036为材料进行营养液培养试验,设置正常水分供应、轻度和重度水分胁迫及低氮、中氮和高氮处理,研究了不同水氮耦合对小麦根系形态、根系吸收面积、根系活力、植株氮素积累量的影响。结果表明,水分与氮素存在着明显的互作效应,重度水分胁迫和低氮处理都会降低小麦的生物量、根系总吸收面积、活跃吸收面积和活力、氮含量和植株的氮素积累量,低氮处理增加了根长和根冠比。高氮处理的西农979根系总吸收面积、活跃吸收面积和活力较低,中氮处理显著提高,且分别比2036高11%、14%、27%。西农979在中氮和高氮处理之间的氮素积累量无显著性差异。中氮处理下西农979的植株氮素积累量比2036高13%~62%。相关分析表明,小麦的活跃吸收面积、根系活力与植株氮素积累量呈极显著正相关($P < 0.01$),和根冠比呈极显著负相关($P < 0.01$)。在轻度水分胁迫下,增加氮素供给能有效提高西农979的根系吸收面积和根系活力;过高的氮素不利于2036根系的生长,表明不同基因型小麦的根系活力和生长对不同水氮耦合的响应不同。通过适宜的水氮耦合调控,有利于创造良好的小麦根系形态,提高根系活力及对水分和养分的吸收能力。

关键词:小麦;干旱胁迫;根系活力;活跃吸收面积;根冠比;氮素积累量

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2017)06-0820-08

Effect of Nitrogen on Root Vigor and Growth in Different Genotypes of Wheat under Drought Stress

WANG Xiubo, SHANGGUAN Zhouping

(State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil/Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The purposes of this study was to investigate the effects of water and N coupling on root vigor and uptake of nitrogen in wheat. Two different cultivars of wheat Xinong 979 and 2036 were planted in Hoagland nutrient solutions. Three treatments of different N levels, low N, normal N and high N and three water regimes, well-watered, moderate drying and severe drying were conducted. The results showed that there was a significant interaction between water regimes and N supply. Severe water stress could decrease the biomass, total absorbing surface, activity absorbing surface, root vigor, nitrogen content and nitrogen accumulation in wheat. Nitrogen deficiency increased the root length and root/shoot, but decreased the biomass, total absorbing surface, activity absorbing surface, activity/total absorbing surface, root vigor, nitrogen content and nitrogen accumulation significantly. The root total absorbing surface, activity absorbing surface and root vigor of Xinong 979 with high N were increased significantly than that of low N and normal N, which are 11%, 14%, 27% higher than those of 2036,

收稿日期:2016-07-11

修回日期:2016-09-08

基金项目:国家自然科学基金项目(31370425, 31501276); 国家科技支撑计划项目(2015BAD22B01)

第一作者 E-mail: wangxiubo1@126.com

通讯作者:上官周平 (Email: shangguan@ms.iswc.ac.cn)

respectively at high N level. Root N accumulation and shoot N accumulation in Xinong 979 had no significant difference between normal N and high N levels. And the plant N accumulation of Xinong 979 was 13% to 62% higher than that of 2036 at normal N level. Correlation analysis showed that activity absorbing surface and root vigor were positively correlated with plant N accumulation ($P < 0.01$), while there was significant negative correlation between activity absorbing surface, root vigor and root/shoot ($P < 0.01$). A negative correlation was observed between root/shoot and plant N accumulation ($P < 0.01$). The increase of nitrogen supply can improve the absorbing surface and root vigor of Xinong 979 effectively, but excessive nitrogen supply was not conducive to the root growth of 2036. These results suggested that the root vigor and growth of wheat with different genotypes respond differently to water and nitrogen coupling. Optimal regulations of water and N supply are beneficial to the formation of good root morphology and increase root vigor, therefore leading to the enhanced ability of absorbing moisture and nutrients.

Key words: Wheat; Drought stress; Root vigor; Activity absorbing surface; Root/Shoot; N accumulation

水分和养分是影响旱地农业生产的主要生态环境因子,二者既有各自的特殊作用,又互相作用,对作物的产量和品质产生不同影响。植物根系具有支撑和固定植物,以及从土壤中吸收水分和养分的双重功能,同时又是多种离子、有机酸、激素和氨基酸合成的重要场所,是产量形成的重要贡献者和土壤养分的充分利用者,根系形态及生理特性的发挥受环境及基因的共同影响^[1-2]。当作物遇到水分胁迫或养分亏缺时,根系和幼苗的生长受到抑制,根系的生理特性也会发生一系列的变化^[3]。小麦苗期以营养生长为主,产生分蘖与次生根,初生根和叶片仍在生长,对营养、水分等条件极为敏感^[4]。马富举等^[5]研究发现,干旱胁迫提高了小麦幼苗的根系活力,而抑制了根数和根系表面积,不同耐旱型品种对干旱胁迫的适应性存在差异。熊明彪等^[6]研究发现,增施氮素和钾素可以明显提高冬小麦根系的呼吸和吸收功能,推迟根系的衰老进程。水分和养分对根系的影响存在明显交互作用^[2,7]。根系的生长发育及其对水分、养分的要求和反应因作物的遗传特性而不同。

目前,就水氮耦合对作物生长影响机制方面的研究较多,并形成了“以肥调水、以水促肥”的观点^[8-9]。但对此方面的研究大多都集中在植株地上部分、叶片生理、产量等方面^[10-11],对于水氮耦合下根系的形态与生理特性变化的研究相对较少。本研究在水培条件下,研究不同氮素水平和水分胁迫下小麦的根系形态、根系活力以及根系吸收氮的能力,分析水氮交互作用对小麦根系吸

收能力的影响,并比较两个不同穗型的小麦品种在根系活力和吸收能力上的差异,对阐明水分胁迫时氮素营养对根系生长发育的调控机制和旱地小麦高产、高效栽培具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料为小麦品种西农 979 和大穗型小麦品系 2036。西农 979 是在黄淮冬麦区大面积推广种植的抗逆性良好的多穗型小麦品种。小麦 2036 是从大田实验中性状表现良好、具有高产潜力的品系中筛选出的性状优良的大穗品系^[12]。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

试验设为二因素(水分和氮素)三水平处理,氮源为 NO_3^- ,氮素的 3 个水平为 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NO}_3^-$ (N1)、 $8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NO}_3^-$ (N2)、 $16 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NO}_3^-$ (N3)。每个氮素水平设置 3 个水分处理,分别将 8% PEG6000 (W2, 轻度胁迫)、15% PEG6000 (W3, 重度胁迫)加入 Hoagland 营养液中作为水分胁迫处理,不加 PEG6000 为对照 (W1, 正常水分)。每个处理设置 3 个重复。

1.2.2 试验材料培养

选取饱满、健康的小麦种子,10% H_2O_2 消毒 10 min 后,去离子水冲洗干净,浸泡 24 h,移至铺有灭菌滤纸的培养皿中催芽;挑选发芽较好的种子移入石英砂中,放入 20 °C 的光照培养箱中培养。长至二叶一心时,挑选长势一致的小麦幼苗移入盛有 1/2 Hoagland 营养液黑色塑料盆中,

每盆种植 15 株,在人工气候室内培养,培养条件为光暗比 13/11,光照强度 $800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,温度 $25^\circ\text{C}/20^\circ\text{C}$,湿度为 60%。三叶一心后换成不同氮素浓度的 Hoagland 全营养液培养。营养液每隔 3 d 更换一次,每天调节 pH 至 6.0,用气泵维持营养液溶氧浓度为 $6\sim 8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。小麦生长至四叶一心时,进行水分胁迫处理。幼苗进行水分胁迫处理 4 d 后开始测定根系生理指标。

1.2.3 小麦根长、株高及生物量的测定

小麦经水分胁迫处理 7 d 后,每盆选取 10 株生长一致的幼苗,分离为地上和地下部分,用直尺测定根长和株高,然后放入烘箱中 105°C 杀青 30 min, 70°C 烘干至恒重,分别测定植株地下和地上部的生物量,计算根冠比。

1.2.4 小麦根系吸收面积和活力的测定

小麦经水分胁迫处理 4 d 后,每盆选取 3 株生长一致的小麦根系,用滤纸吸干表面水分,用甲烯蓝吸附法^[13]测定根系总吸收面积、活跃吸收面积,并计算活跃吸收面积/总吸收面积。用四氮唑(TTC)还原法测定根系活力。

1.2.5 小麦植株含氮量的测定

将小麦烘干样品粉碎过 100 目筛,取 0.5 g,经 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 液消煮后,用凯氏定氮法(2300 全自动定氮仪,Sweden)测定小麦根系和地上部全氮含量,并计算植株氮素累积量。

1.3 数据分析

采用 Excel 2010 进行数据、图表处理,用 SPSS 进行统计分析,Duncan's 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同水氮处理对小麦根长、株高、干物质量和根冠比的影响

在相同氮素浓度下,不同水分处理对小麦的根长、株高以及干物质量的影响不同(表 1)。在低氮水平下,水份胁迫使西农 979 的根长显著降低,而 2036 的根长显著增加;水份胁迫对两个品种的株高、根系和地上部干重无显著影响;重度水份胁迫使西农 979 根冠比显著增加,对 2036 根冠比无显著影响。

在中氮水平下,水份胁迫对两个品种的根长、根冠比和西农 979 的株高无显著影响;重度水份胁迫使 2036 的株高、西农 979 的根系干重、两个品种的地上部干重均显著降低。

在高氮水平下,重度水份胁迫对两个品种的根长、株高、地上部干重、根冠比和 2036 的根系干重均无显著影响,使西农 979 的根系干重显著下降(19.2%)。

在相同水分条件下,低氮处理的两个小麦品种的株高、根系干重、地上部干重均较中氮和高氮处理低,而根冠比显著高于中、高氮处理,中、高氮处理间的差异不显著。在正常水分处理下,两个小麦品种的根长、株高以及根冠比在中、高氮处理之间无显著差异,但西农 979 的根系和地上部干重差异显著。

西农 979 和 2036 的株高和根冠比在相同处理间无显著性差异;在中氮水平上,西农 979 的各水分处理地上部干重比 2036 高 27.6%~38.6%,根冠比均较 2036 低。

氮素和水份对小麦根长、株高、根系干重、地上部干重及根冠比的影响均达极显著水平。品种对根长、地上部干重影响极显著,对株高影响显著。根长、株高、根系干重和地上部干重受水分与氮素的交互作用影响达到极显著水平。说明氮素和水份对根长、株高、根系干重和地上部干重存在一定的正交互作用。

2.2 不同水氮处理对小麦根系吸收面积的影响

同一氮素水平下,水份胁迫使两品种根系的总吸收面积和活跃吸收面积显著降低(表 2)。在中、高氮处理下,两品种水份胁迫处理间的活跃吸收面积/总吸收面积无显著差异。高氮处理下,两个品种在轻度和重度水份胁迫下根系的总吸收面积和活跃吸收面积无显著差异;中氮处理下,轻度水份胁迫显著提高了西农 979 的总吸收面积和活跃吸收面积;低氮处理下,2036 的活跃吸收面积/总吸收面积在轻度水份胁迫下显著提高,而西农 979 在重度水份胁迫下显著提高。

在同一水分条件下,随氮素水平的提高,两个小麦品种的根系总吸收面积、活跃吸收面积和活跃吸收面积/总吸收面积基本呈增加的趋势。在轻度水份胁迫下,西农 979 的总吸收面积比 2036 高 11%~18%。在重度水份胁迫下,西农 979 的活跃吸收面积比 2036 高 14%~72%。西农 979 在高氮正常水分供应下的总吸收面积和活跃吸收面积最高,而 2036 的这两个参数在中氮正常水分供应下最高。

交互作用结果(表 2)表明,水分、氮素对小麦的总吸收面积、有活跃吸收面积和活跃吸收面积/

总吸收面积有极显著影响。水分与氮素的交互作用对小麦的总吸收面积、活跃吸收面积和活跃吸收面积/总吸收面积有极显著影响。

表 1 不同水分和氮素处理下小麦的根长、株高、根系生物量、地上部生物量及根冠比

Table 1 Root length, plant height, root biomass, shoot biomass and root/shoot of two wheat seedlings under different water and nitrogen treatments

| 处理 Treatment | 根长 Root length/cm | | 株高 Plant height/cm | | 根系干重 Root biomass/g | | 地上部干重 Shoot biomass/g | | 根冠比 Root/shoot | |
|-------------------------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|---------------|-----------------------|-------------|----------------------|-------------|
| | 西农 979 Xinong 979 | 2036 | 西农 979 Xinong 979 | 2036 | 西农 979 Xinong 979 | 2036 | 西农 979 Xinong 979 | 2036 | 西农 979 Xinong 979 | 2036 |
| W ₁ N ₁ | 36.07±0.85d | 36.27±2.05c | 19.27±1.42a | 17.77±1.77a | 0.114±0.01a | 0.114±0.02a | 0.104±0.01a | 0.111±0.02a | 1.104±0.08b | 1.028±0.13b |
| W ₂ N ₁ | 28.27±2.31bc | 40.83±2.25cd | 18.23±0.77a | 17.97±1.55a | 0.125±0.00ab | 0.122±0.00ab | 0.103±0.01a | 0.110±0.02a | 1.216±0.11bc | 1.119±0.17b |
| W ₃ N ₁ | 21.63±2.21a | 41.90±1.58d | 16.63±0.81a | 18.27±2.33a | 0.130±0.01ab | 0.110±0.01a | 0.097±0.01a | 0.095±0.01a | 1.353±0.12c | 1.181±0.26b |
| W ₁ N ₂ | 26.01±1.80abc | 26.90±3.95ab | 25.30±0.98bc | 29.97±0.45cd | 0.203±0.01d | 0.205±0.01d | 0.555±0.01d | 0.431±0.02c | 0.366±0.01a | 0.475±0.01a |
| W ₂ N ₂ | 27.51±2.32abc | 26.10±2.22ab | 27.43±2.10bcd | 28.53±1.60cd | 0.162±0.01c | 0.156±0.01bc | 0.427±0.02c | 0.349±0.02b | 0.382±0.02a | 0.447±0.02a |
| W ₃ N ₂ | 26.31±2.06abc | 22.33±2.34a | 25.03±1.36bc | 22.60±1.47b | 0.166±0.01c | 0.177±0.01cd | 0.423±0.02c | 0.305±0.02b | 0.392±0.01a | 0.582±0.01a |
| W ₁ N ₃ | 29.51±2.71bc | 29.33±0.97b | 30.80±24.5d | 32.13±0.90d | 0.161±0.01c | 0.142±0.01abc | 0.392±0.01bc | 0.329±0.03b | 0.410±0.02a | 0.432±0.02a |
| W ₂ N ₃ | 23.77±0.45ab | 24.80±2.30ab | 24.50±1.34b | 27.80±1.30c | 0.130±0.01ab | 0.171±0.01cd | 0.365±0.02bc | 0.493±0.05d | 0.359±0.03a | 0.348±0.02a |
| W ₃ N ₃ | 31.50±2.53cd | 24.10±1.27ab | 28.63±1.36cd | 29.73±0.60cd | 0.136±0.00b | 0.177±0.02cd | 0.349±0.04b | 0.324±0.02b | 0.395±0.04a | 0.544±0.02a |
| F _N | 77.154*** | | 317.790*** | | 120.650*** | | 906.044*** | | 356.693*** | |
| F _W | 7.895** | | 15.002*** | | 5.099** | | 25.995*** | | 6.689** | |
| F _V | 17.352*** | | 7.167* | | 2.779ns | | 20.609*** | | 0.604 | |
| F _{V×N} | 53.397*** | | 2.344 | | 7.233** | | 34.742*** | | 7.223** | |
| F _{V×W} | 3.603* | | 1.458 | | 2.924 | | 14.173*** | | 0.603 | |
| F _{N×W} | 4.867** | | 13.101*** | | 10.369*** | | 23.941*** | | 1.606 | |
| F _{V×N×W} | 19.074*** | | 5.961** | | 6.401** | | 7.082*** | | 0.814 | |

同列数据后不同字母表示表示处理间差异显著(P<0.05); *, **, *** 分别表示 F 值在 0.05、0.01 和 0.001 水平上显著; N: 氮素; W: 水分; V: 品种。下同。

Different letters in the same column indicate significant difference(P<0.05); *, **, and *** indicated that F value was significant at 0.05, 0.01 and 0.001 levels; N: Nitrogen, W: Water, V: Variety. The same below.

表 2 不同水分和氮素处理下小麦的根系吸收面积和根系活力

Table 2 Root absorption surface and root vigor of two wheat seedlings under different water and nitrogen regimes

| 处理 Treatment | 总吸收面积 Total absorption surface/ (m ² · plant ⁻¹) | | 活跃吸收面积 Activity absorption surface (m ² · plant ⁻¹) | | 活跃吸收面积/总吸收面积 Activity absorption surface/ Total absorption surface/% | | 根系活力 Root vigor/ (ug · g ⁻¹ · h ⁻¹) | |
|-------------------------------|---|-------------|--|---------------|--|---------------|--|--------------|
| | 西农 979 Xinong 979 | 2036 | 西农 979 Xinong 979 | 2036 | 西农 979 Xinong 979 | 2036 | 西农 979 Xinong 979 | 2036 |
| W ₁ N ₁ | 0.864±0.01c | 0.859±0.03b | 0.327±0.02b | 0.304±0.02b | 37.90±2.92ab | 35.52±4.31ab | 37.56±2.00b | 28.63±2.84b |
| W ₂ N ₁ | 0.653±0.03b | 0.553±0.04a | 0.235±0.01ab | 0.356±0.05bc | 35.93±1.52a | 64.7±9.38d | 25.56±4.00a | 34.56±4.24bc |
| W ₃ N ₁ | 0.435±0.01a | 0.456±0.03a | 0.205±0.01a | 0.119±0.01a | 47.22±3.16c | 26.24±3.87a | 24.27±3.39a | 16.77±1.09a |
| W ₁ N ₂ | 1.037±0.05d | 1.256±0.07d | 0.663±0.02d | 0.647±0.03f | 50.33±5.00c | 51.69±5.32cd | 53.22±4.03c | 61.22±3.86f |
| W ₂ N ₂ | 1.252±0.04e | 1.097±0.05c | 0.522±0.05c | 0.507±0.03ef | 53.00±0.57cd | 46.38±5.19bc | 66.45±2.52c | 45.89±3.34de |
| W ₃ N ₂ | 0.990±0.04d | 0.939±0.03b | 0.523±0.03c | 0.382±0.03bcd | 52.87±2.79cd | 40.67±2.35abc | 42.67±2.66bc | 40.26±3.89cd |
| W ₁ N ₃ | 1.324±0.06e | 1.102±0.09c | 0.794±0.05e | 0.573±0.02fg | 59.96±1.63d | 51.99±1.59cd | 106.89±6.68e | 62.33±4.37f |
| W ₂ N ₃ | 1.055±0.06d | 0.946±0.05b | 0.477±0.03c | 0.469±0.04de | 45.36±4.86bc | 49.70±4.38bcd | 93.78±2.00d | 73.74±4.89g |
| W ₃ N ₃ | 1.108±0.01d | 0.909±0.01b | 0.567±0.02cd | 0.425±0.02cde | 51.19±2.72cd | 46.81±3.16bc | 90.67±2.91d | 52.44±0.83ef |
| F _N | 618.694*** | | 448.139*** | | 24.691*** | | 1103.405*** | |
| F _W | 166.047*** | | 100.440*** | | 6.392** | | 92.105*** | |
| F _V | 31.027*** | | 42.362*** | | 3.515 | | 235.562*** | |
| F _{V×N} | 126.766*** | | 16.442*** | | 3.462* | | 126.766*** | |
| F _{V×W} | 8.215** | | 13.130*** | | 26.978*** | | 3.557* | |
| F _{N×W} | 27.267*** | | 20.180*** | | 10.428*** | | 1.001 | |
| F _{V×N×W} | 13.027*** | | 25.849*** | | 14.742*** | | 30.006*** | |

2.3 不同水氮处理对小麦根系活力的影响

由表 2 可知,在同一氮素浓度下,重度水分胁迫显著降低了小麦的根系活力(2036 高氮水平除外),两个品种在低氮处理下的根系活力较中、高氮水平显著降低。在同一水分条件下,随氮素浓度的提高,两个小麦品种的根系活力显著增加(P

<0.05)。在正常水分处理下,大穗小麦 2036 的根系活力在中、高氮水平间无显著差异。在轻度水分胁迫下,西农 979 的根系活力在中、高氮处理下比 2036 分别高了 44%和 27%。在所有水分处理下,西农 979 的根系活力在高氮处理下比大穗小麦 2036 高 27%~73%。西农 979 在高氮正常

水分供应下的根系活力最高,而大穗小麦 2036 在高氮轻度水分胁迫下的根系活力最高。

交互作用结果(表 2)表明,水分、氮素及品种对根系活力有极显著影响,但是水分和氮素互作效应对根系活力影响不显著。

2.4 不同水氮处理对小麦氮素积累量的影响

在同一氮素水平下,两种水分胁迫处理显著降低了两个品种的根系氮含量和地上部氮含量(西农 979 W_2N_2 除外)(表 3),轻度水分胁迫和重度水分胁迫之间无显著性差异(西农 979 高氮水平除外)。在同一水分条件下,两个品种在低氮处理下的根系和地上部氮含量均较中、高氮水平显著降低。在正常水分供应下,随氮素水平增加,两个品种植株的根系和地上部氮含量显著增加;在轻度和重度水分胁迫下,根系和地上部含氮量在中、高氮处理间基本无显著差异。两个小麦品种相比,大穗小麦 2036 在中、高氮和两种水分胁迫下的根系和地上部含氮量比西农 979 低 10%~45%,根系氮含量在高氮重度水分胁迫下差异显著。

相同氮素处理下,较正常水分条件,两种水分

胁迫处理使两个小麦品种的根系、地上部和植株氮素积累量均有不同程度下降,在低氮处理下的差异不显著;中氮处理下,差异显著,轻度和重度水分胁迫之间无显著差异;高氮处理下,差异显著,大穗小麦 2036 的根系、地上部和植株的氮素积累量在轻度和重度水分胁迫间差异显著。同一水分条件下,两个品种低氮处理下的地上部、根系和植株氮素积累量均显著低于中、高氮处理($P < 0.05$)。正常水分条件下,两个品种的根系、地上部和植株的氮素积累量在中、高氮处理之间无显著差异。在轻度和重度水分胁迫条件下,西农 979 的根系、地上部和植株的氮素积累量在中氮处理下最高。轻度水分胁迫下,2036 的氮素积累量在高氮处理下最高。在中氮处理下,西农 979 的植株氮素积累量比大穗小麦 2036 增加 13%~62%。

交互作用结果(表 3)表明,水分、氮素及其交互作用对小麦植株的氮含量和氮素积累量均有极显著影响。品种对根系氮含量和氮素积累量无显著影响。品种、水分和氮素的互作效应对被测指标有极显著影响。

表 3 不同水分和氮素处理下小麦的含氮量和氮素积累量

Table 3 Nitrogen concentration and accumulation of two wheat seedlings under different water and nitrogen regimes

| 处理 Treatment | 根系氮含量 Root N concentration/ (mg · g ⁻¹) | | 地上部氮含量 Shoot N concentration/ (mg · g ⁻¹) | | 地上部氮素积累量 Shoot N accumulation/ (mg · plant ⁻¹) | | 根系氮素积累量 Root N accumulation/ (mg · plant ⁻¹) | | 植株氮素积累量 Plant N accumulation/ (mg · plant ⁻¹) | |
|-------------------------------|---|-------------|---|------------|--|-------------|--|-------------|---|-------------|
| | 西农 979 Xinong 979 | 2036 | 西农 979 Xinong 979 | 2036 | 西农 979 Xinong 979 | 2036 | 西农 979 Xinong 979 | 2036 | 西农 979 Xinong 979 | 2036 |
| | W ₁ N ₁ | 1.73±0.21b | 1.71±0.15b | 3.12±0.26b | 3.01±0.17b | 3.27±0.57a | 3.33±0.33a | 1.97±0.18a | 1.93±0.29a | 5.24±0.73a |
| W ₂ N ₁ | 1.08±0.26a | 1.12±0.17a | 2.29±0.14a | 2.29±0.35a | 2.37±0.26a | 2.52±0.48a | 1.35±0.32a | 1.37±0.20a | 3.72±0.50a | 3.88±0.28a |
| W ₃ N ₁ | 1.21±0.10a | 1.28±0.17ab | 2.01±0.23a | 2.26±0.14a | 1.95±0.35a | 2.16±0.38a | 1.57±0.19a | 1.40±0.19a | 3.52±0.52a | 3.57±0.19a |
| W ₁ N ₂ | 4.81±0.07d | 5.46±0.19e | 7.07±0.19e | 7.43±0.46d | 39.18±0.70d | 32.02±0.37d | 9.77±0.37c | 11.19±0.12d | 48.96±0.80d | 43.21±0.25d |
| W ₂ N ₂ | 4.25±0.32cd | 3.54±0.37d | 5.88±0.31d | 4.49±0.27c | 25.08±1.75c | 15.68±0.94b | 6.93±0.75b | 5.55±0.81bc | 32.01±2.25c | 21.23±1.35b |
| W ₃ N ₂ | 3.92±0.42c | 3.52±0.17d | 5.94±0.16d | 4.31±0.43c | 25.13±1.42c | 13.14±1.12b | 6.53±0.87b | 6.26±0.38c | 31.66±2.02c | 19.40±0.87b |
| W ₁ N ₃ | 5.43±0.28e | 7.09±0.23f | 9.20±0.04f | 9.72±0.22e | 36.08±0.70d | 31.96±1.91d | 8.73±0.75c | 10.09±1.17d | 44.81±0.98d | 42.05±2.94d |
| W ₂ N ₃ | 4.68±0.41d | 3.99±0.22d | 5.14±0.15c | 4.28±0.05c | 18.79±1.54b | 21.11±2.03c | 6.11±0.71b | 6.84±0.76c | 24.90±0.97b | 27.96±2.71c |
| W ₃ N ₃ | 4.34±0.12cd | 2.35±0.47c | 5.95±0.37d | 4.36±0.47c | 20.84±3.64b | 14.20±2.20b | 5.91±0.11b | 4.12±0.43b | 26.75±3.56b | 18.32±1.76b |
| F _N | 342.726*** | | 634.702*** | | 1368.947*** | | 610.930*** | | 1723.120*** | |
| F _W | 88.081*** | | 315.746*** | | 333.289*** | | 144.756*** | | 417.424*** | |
| F _V | 0.421 | | 18.575*** | | 106.395*** | | 0.006 | | 84.381*** | |
| F _{V×N} | 0.248 | | 7.882** | | 52.661*** | | 0.128 | | 41.961*** | |
| F _{V×W} | 14.627*** | | 12.376*** | | 8.018** | | 9.871*** | | 10.032*** | |
| F _{N×W} | 18.941*** | | 62.628*** | | 67.872*** | | 27.692*** | | 82.667*** | |
| F _{V×N×W} | 6.172** | | 5.124** | | 5.714** | | 6.048** | | 7.584*** | |

2.5 根系活力、根系吸收面积、植株氮素积累量和根冠比的相关性

通过不同氮素水平和水分条件下的小麦根系活力、根系活跃吸收面积、植株氮素积累量和根冠比之间的相关性分析结果(图 1)可知。小麦的活

跃吸收面积与根系活力、植株氮素积累量呈显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$)的正相关关系;活跃吸收面积与根冠比呈极显著的负相关($P < 0.01$);根系活力和植株氮素积累量呈极显著正相关($P < 0.01$);根系活力和根冠比呈极显著负相

关($P < 0.01$);根冠比和植株氮素积累量呈极显著负相关($P < 0.01$)。

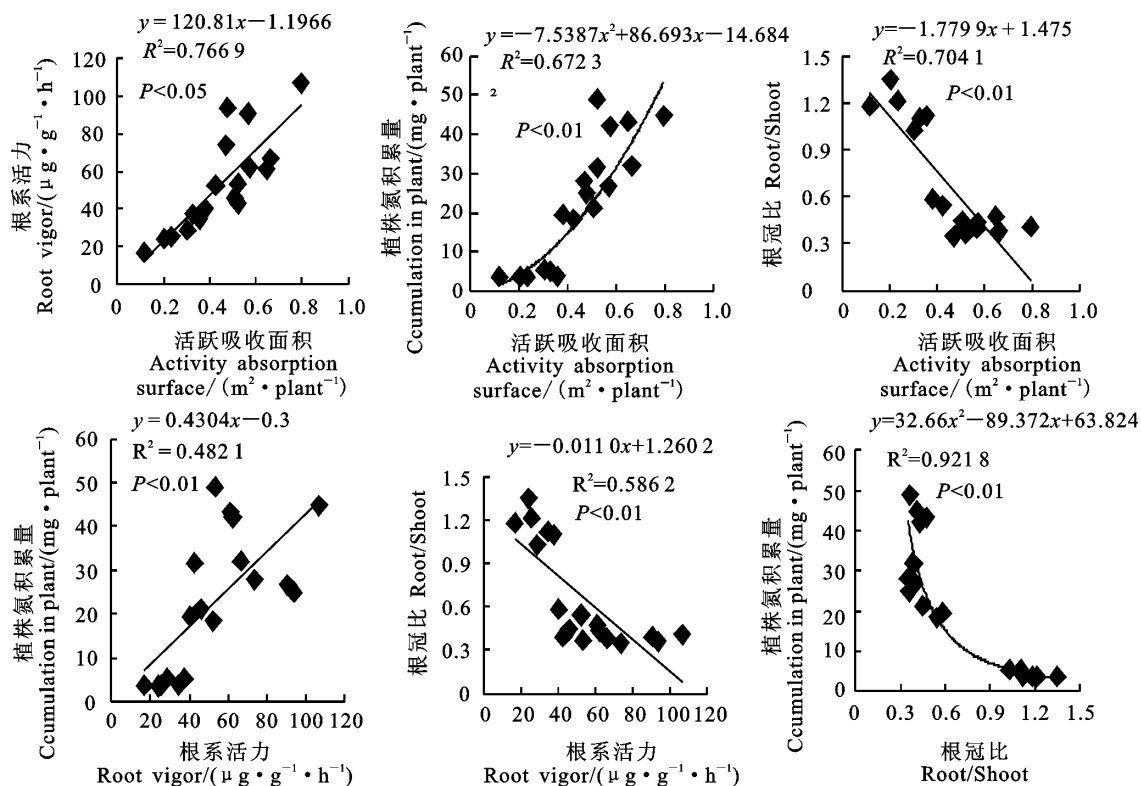


图 1 根系活力、活跃吸收面积、植株氮素积累量、根冠比之间的相关性

Fig. 1 Correlation analysis between root vigor, activity absorbing surface, N accumulation in plant and root/shoot

3 讨论

国内外学者就土壤水分状况和肥料施用量对小麦的根系形态、根系生理特性、根系对环境因子的响应等方面进行了广泛而深入的研究^[14-15]。但大多都集中在单因子对根系的影响,而对于水氮耦合下根系形态生理差异研究很少。

小麦苗期的生物量、株高、根冠比等形态指标是影响其产量形成的重要因素。水分胁迫对小麦的生长、发育具有不利影响,会降低生物量、株高和叶面积,而施氮能够增加生物量、株高、叶面积等^[16-17]。梁银丽等^[18]研究表明,土壤水分严重亏缺时,小麦根系生长受到限制,根系干物质质量减少,根长降低,而轻度干旱则有利于根系的延伸生长。本研究结果表明,水分胁迫在不同氮素水平下对小麦根长、株高的影响不同。在中、高氮水平下,水分胁迫会显著降低小麦的根系和地上部的生物量,在低氮水平下,小麦的根长增加,株高降低,根系和地上部的生物量也显著降低,这可能与缺氮直接影响植物光合产物的形成和干物质积累有关,根冠比的增加说明小麦在缺氮时会抑制小

麦地上部的生长,但促进根部生长。当低氮和重度水分胁迫同时发生时,小麦的根冠比最高,说明此环境严重抑制了小麦地上部分的的生长,这与王晨阳等^[19]研究结果一致。适当的施氮能够提高小麦的株高、根系和地上植株的生物量,但在高氮素供应下,小麦的生物积累量却有所降低。在轻度水分胁迫时,高氮素供应能够提高大穗小麦 2036 的根系和地上部的生物量,但降低了西农 979 的生物量积累。说明不同基因型小麦在不同水氮条件下的适应策略是不同的。两个品种在中氮和充足水分供应下植株的生物量积累最高。与水分胁迫相比,氮素水平对小麦生长的影响更大。

植物对养分的吸收是根系形态和生理特性共同作用的结果。氮素经根系吸收进体内后,只有不断地被同化和转运才能更有效地被吸收,所以根系的生理特性对氮素的高效吸收和利用具有重要影响^[20]。根系的总吸收面积、活跃吸收面积是反映根系对养分吸收能力的重要指标^[21]。根系的还原力决定根系对养分的同化能力,反映了根系新陈代谢能力的强弱,是根系活力的重要体现^[22]。正常水氮供应促进根系生长,增加根系总

吸收面积、活跃吸收面积和根系活力,促进根系对养分的吸收,从而增加作物产量^[23]。本研究发现,水分胁迫和低氮处理降低了小麦的总吸收面积、活跃吸收面积、活跃吸收面积/总吸收面积和根系活力,而适量增加氮素供给能够增加根系的总吸收面积、活跃吸收面积和根系活力。两个小麦品种在高氮处理下的根系吸收能力不同,高氮素供给能够有效提高西农 979 的根系活跃吸收面积和根系活力,但并不能增加大穗小麦 2036 的根系吸收面积和根系活力,说明不同小麦品种间的根系吸收能力存在一定差异。在适量氮素供应下,西农 979 在遇到轻度水胁迫时,会通过提高根系的总吸收面积、活跃吸收面积和根系的活力来适应环境的变化,提高吸收水分和养分的能力。本试验表明,重度水分胁迫后小麦的根系总吸收面积、活跃吸收面积及根系活力明显减弱,说明根系在遭受严重水分胁迫时,细胞形态及功能受到一定的损伤,影响了根系功能的维持。在轻度水分胁迫时,氮素对小麦的根系吸收面积和根系活力有一定的促进作用,而在重度水分胁迫下,氮素的调节作用则会减弱。

作物根系对氮素的吸收能力取决于根量大小和单位根系吸收能力^[24]。本研究表明,水分胁迫会降低小麦的根系、地上部和植株的氮含量和氮素积累量,适度的供氮能够有效提高小麦的根系氮素积累量,但高氮素供给对小麦的氮素积累量并没有显著的影响。高氮素供应下小麦根系的吸收面积和根系活力增加,吸收氮素能力增加,使氮含量提高,但是其干物质质量却降低,导致其氮素积累量并无显著的提高。在水分胁迫下,小麦根系向地上部供应的氮素量减少;在中氮素供应下,西农 979 的植株氮素积累量比大穗小麦 2036 高,是因为西农 979 在水分胁迫下的根系活跃吸收面积和根系活力升高,根系吸收积累氮素能力增强。本研究还表明,小麦根系活跃吸收面积、根系活力提高能够显著增加植株氮素积累量,降低根冠比,提高小麦对水分和养分的吸收能力。

低氮素供应可加剧水分胁迫对小麦的伤害,大幅降低其根系吸收面积和根系活力,从而影响植株对水分和养分的吸收能力,使植株的氮素积累量和生物量降低。适量增加氮素供应有利于西农 979 的根系吸收面积和根系活力的提高,但高氮素供给对大穗小麦 2036 的根系活力和吸收养分的能力并没有显著的影响。本试验结果表明,

过高的氮素供应对小麦苗期的根系生长没有明显的促进作用,甚至会抑制小麦根系的生长,同时也造成资源的浪费。因此在农业生产中,应依据不同基因型小麦对氮素和水分的不同适应性,合理的进行水肥调控,提高小麦根系吸收面积和根系活力,从而增加小麦对水分和养分的吸收能力,增强其对水分胁迫的适应能力。

根系活力对水分胁迫的反应更为敏感,而生物量和氮素积累量是植物需要一定时间积累的过程。本研究所测得的小麦根系活力和生物量是在水分胁迫处理的不同阶段取样。根系吸收面积和活力与生物量积累之间的关系是否对本研究的结论有影响还需进一步的研究来明确。

参考文献:

- [1] KIBA T, KUDO T, KOJIMA M, *et al.* Hormonal control of nitrogen acquisition: Roles of auxin, abscisic acid, and cytokinin [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(4): 1400.
- [2] 徐国伟, 王贺正, 翟志华, 等. 不同水氮耦合对水稻根系形态生理、产量与氮素利用的影响 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 132.
XU G W, WANG H Z, ZHAI Z H, *et al.* Effect of water and nitrogen coupling on root morphology and physiology, yield and nutrition utilization for rice [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(10): 132.
- [3] 张国盛, 张仁陟, 黄高宝. 水分胁迫条件下春小麦根系对施肥的响应 [J]. *草业学报*, 2003, 12(3): 105.
ZHANG G S, ZHANG R Z, HUANG G B. Response of root system of spring wheat to fertilizers under water stress [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2003, 12(3): 105.
- [4] 邢军, 孙敏, 高志强, 等. 氮磷肥对旱地小麦土壤水分与根系特性的影响 [J]. *中国农学通报*, 2014, 30(6): 83.
XING J, SUN M, GAO Z Q, *et al.* The impact of nitrogen and phosphorus fertilizer on soil moisture and root characteristics of dry-land wheat [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(6): 83.
- [5] 马富举, 李丹丹, 蔡剑, 等. 干旱胁迫对小麦幼苗根系生长和叶片光合作用的影响 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(3): 724.
MA F J, LI D D, CAI J, *et al.* Responses of wheat seedlings root growth and leaf photosynthesis to drought stress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(3): 724.
- [6] 熊明彪, 罗茂盛, 田应兵, 等. 小麦生长期土壤养分与根系活力变化及其相关性研究 [J]. *土壤肥料*, 2005(3): 8.
XIONG M B, LUO M S, TIAN Y B, *et al.* Dynamics of soil nutrition and wheat root activities and their relationships during wheat growth [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2005(3): 8.
- [7] 李秀芳, 李淑文, 和亮, 等. 水肥配合对夏玉米养分吸收及根系活性的影响 [J]. *水土保持学报*, 2011, 25(1): 188.

- LI X F, LI S W, HE L, *et al.* Effects of water and fertilizer cooperation on plant nutrient accumulation and root activity of summer maize [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(1): 188.
- [8] SANDHU S S, MAHAL S S, VASHIST K K, *et al.* Crop and water productivity of bed transplanted rice as influenced by various levels of nitrogen and irrigation in northwest India [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 104: 32.
- [9] LIU L, CHEN T, WANG Z, *et al.* Combination of site-specific nitrogen management and alternate wetting and drying irrigation increases grain yield and nitrogen and water use efficiency in super rice [J]. *Field Crops Research*, 2013, 154: 226.
- [10] 李银坤, 武雪萍, 吴会军, 等. 水氮条件对温室黄瓜光合日变化及产量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 122.
- LI Y K, WU X P, WU H J, *et al.* Effects of water and nitrogen conditions on the diurnal variation of photosynthesis and yield of cucumber in greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(1): 122.
- [11] CABRERA-BOSQUET L, MOLERO G, BORT J, *et al.* The combined effect of constant water deficit and nitrogen supply on WUE, NUE and $\Delta^{13}C$ in durum wheat potted plants [J]. *Annals of Applied Biology*, 2007, 151(3): 277.
- [12] 王丽芳, 王德轩, 上官周平. 大穗型小麦叶片性状、养分含量及氮素分配特征 [J]. *生态学报*, 2013, 33(17): 5219.
- WANG L F, WANG D X, SHANGGUAN Z P. Structural characters and nutrient contents of leaves as well as nitrogen distribution among different organs of big headed wheat [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(17): 5219.
- [13] 李合生, 孙群, 赵世杰, 等. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 164.
- LI H S, SUN Q, ZHAO S J, *et al.* The Experiment Principle and Technique on Plant Physiology and Biochemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 164.
- [14] 苗果园, 高志强, 张云亭, 等. 水肥对小麦根系整体影响及其与地上部相关的研究 [J]. *作物学报*, 2002, 28(4): 445.
- MIAO G Y, GAO Z Q, ZHANG Y T, *et al.* Effect of water and fertilizer to root system and its correlation with tops in wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(4): 445.
- [15] PALTA J A, CHEN X, MILROY S P, *et al.* Large root systems: Are they useful in adapting wheat to dry environments? [J]. *Functional Plant Biology*, 2011, 38(5): 347.
- [16] 张艳, 张洋, 陈冲, 等. 水分胁迫条件下施氮对不同水氮效率基因型冬小麦苗期生长发育的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2009, 29(5): 844.
- ZHANG Y, ZHANG Y, CHENG C, *et al.* Effect of water stress and nitrogen application on growth and development of winter wheat genotypes with different water and nitrogen use efficiency at seedling stage [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(5): 844.
- [17] 张洋, 翟丙年. 水分胁迫条件下氮素营养对不同冬小麦基因型的生理效应 [J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(3): 492.
- ZHANG Y, ZHAI B N. Physiological effects of nitrogen on different winter wheat genotypes under water stress [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(5): 844.
- [18] 梁银丽, 陈培元. 土壤水分和氮磷营养对小麦根系生理特性的调节作用 [J]. *植物生态学报*, 1996, 20(3): 255.
- LIANG Y L, CHEN P Y. Adjustment of physiological characters of root systems of wheat by soil moisture, nitrogen [J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1996, 20(3): 255.
- [19] WANG C, LIU W, LI Q, *et al.* Effects of different irrigation and nitrogen regimes on root growth and its correlation with above-ground plant parts in high-yielding wheat under field conditions [J]. *Field Crops Research*, 2014, 165: 138.
- [20] 戴林, 李廷轩, 张锡洲, 等. 氮高效利用基因型水稻根系形态和活力特征 [J]. *中国农业科学*, 2012, 45(23): 4770.
- JI L, LI T X, ZHANG X Z, *et al.* Root morphological and activity characteristics of rice genotype with high nitrogen utilization efficiency [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(23): 4770.
- [21] 熊淑萍, 吴克远, 王小纯, 等. 不同氮效率基因型小麦根系吸收特性与氮素利用差异的分析 [J]. *中国农业科学*, 2016, 49(12): 2267.
- XIONG S P, WU K Y, WANG X C, *et al.* Analysis of root absorption characteristics and nitrogen utilization of wheat genotypes with different N efficiency [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(12): 2267.
- [22] 刘小刚, 张富仓, 杨启良, 等. 玉米叶绿素、脯氨酸、根系活力对调亏灌溉和氮肥处理的响应 [J]. *华北农学报*, 2009, 24(4): 106.
- LIU X G, ZHANG F C, YANG Q L, *et al.* Response of chlorophyll, proline and root activity of maize to regulated deficit irrigation and N fertilization treatment [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2009, 24(4): 106.
- [23] 张礼军, 张恩和, 郭丽琢, 等. 水肥耦合对小麦/玉米系统根系分布及吸收活力的调控 [J]. *草业学报*, 2005, 14(2): 102.
- ZHANG L J, ZHANG E H, GUO L Z, *et al.* Regulation of water-fertilizer coupling on root distribution and absorbing ability in *Triticum aestivum*-*Zea mays* intercrop system [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(2): 102.
- [24] 王艳哲, 刘秀位, 孙宏勇, 等. 水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3): 282.
- WANG Y Z, LIU X W, SUN H Y, *et al.* Effects of water and nitrogen on root/shoot ratio and water use efficiency of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(3): 282.