

水肥耦合对玉米化学计量学特征及其生长性状的影响

张 赛, 王龙昌, 石 超, 陈 娇, 邢 毅, 马淑敏, 张小短

(西南大学农学与生物科技学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 南方山地农业教育部工程研究中心, 重庆 400716)

摘要: 为了探讨不同水肥条件下玉米 C、N、P 化学计量学特征及其影响因素, 设置土壤不同含水量和全氮含量的盆栽试验, 分析了不同水肥对玉米生长性状和碳氮磷化学计量学特征的影响, 并对两者进行了相关分析。试验设置田间持水量的 90%, 70%, 50% (W1、W2、W3), 田间正常施氮量的 150%, 100%, 50%, (N1、N2、N3), 共 9 个处理。结果表明: 玉米根、茎、叶不同器官干物质质量均随着施氮量的减少而减少, 随着土壤含水量的增加而增加。高、中水分时玉米株高随着施氮量的增加而增加, 当玉米处于干旱胁迫时施氮量对玉米株高影响不大。低水分下的茎粗显著低于高、中水分。玉米根、茎、叶的 C 含量差异不显著。低氮施肥处理下玉米根、茎和叶的 N 含量均显著低于中、高氮处理, 而后两者对根、茎和叶的 N 含量的影响表现不一, 其中对茎氮含量差异达到显著水平, 对叶氮含量在抽雄期以后才显著。玉米 C : N : P 生态化学计量特征随水肥因素的变化表现不一, 其中 N/P 平均为 6.01, 随着施氮量的增加而升高, 随土壤含水量的增加而降低; C/N 为 0.31, 随着施氮量的增加而降低, 对水分因素不敏感; C/P 为 1.62, 表现出强烈的内稳性, 不随外界生物与非生物环境的变化而变化。

关键词: 水肥耦合; N/P; C/N; C/P; 生长性状; 玉米

中图分类号: S311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)05-0252-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.05.041

Effects of Water and Fertilizer Coupling on the Stoichiometry Characteristics and Growth Traits of Maize

ZHANG Sai, WANG Longchang, SHI Chao, CHEN Jiao, XING Yi, MA Shumin, ZHANG Xiaoduan

(College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University, Key Laboratory of
Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Engineering
Research Center of South Upland Agriculture, Ministry of Education, Chongqing 400716)

Abstract: In order to explore stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in maize and influencing factors under different water and fertilization conditions, pot experiments with different soil water contents and total nitrogen contents were conducted, and the effects of different treatments on maize growth traits and stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus were discussed, meanwhile the correlation analysis was carried out. Three moisture gradients including 90% (W1), 70% (W2) and 50% (W3) of field capacity, respectively, three nitrogen levels (150% (N1), 100% (N2) and 50% (N3) of normal nitrogen application in the field, respectively) were set up, and there were nine treatments in the experiment. The results showed that the dry biomass of maize root, stem and leaf diminished as the decreasing of nitrogen amount, increased with the increasing of soil moisture content. When the soil moisture was in high and middle level, plant height of maize increased with the increasing of nitrogen application rate. When maize was under drought stress, nitrogen application rate had little effect on plant height. Stem diameter under low moisture was significantly lower than those under high and medium moisture. There was no significant difference in carbon content among maize root, stem and leaf. Nitrogen contents of maize root, stem and leaf in N3 treatment were significantly lower than those in other two treatments. N1 and N2 treatments had different effects on nitrogen content of maize root, stem and leaf. The difference of stem nitrogen

收稿日期: 2018-05-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(31700364); 公益性行业(农业)科研专项(201503127); 西南大学博士基金项目(SWU116073)

第一作者: 张赛(1987—), 女, 博士, 讲师, 主要从事农业生态与可持续发展研究。E-mail: 532875132@qq.com

通信作者: 王龙昌(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业生态与可持续发展研究。E-mail: wanglc2003@163.com

content reached significant level, while the difference in leaf nitrogen content was significant after tasseling stage. The ecological stoichiometric characteristics of C/N: P were different with the change of water and fertilizer, in which the average nitrogen and phosphorus ratio (N/P) was 6.01, and it increased with the increasing of nitrogen application, decreased with the increasing of soil water content. Carbon and nitrogen ratio (C/N) was 0.31, and decreased with the increasing of nitrogen application, but it was not sensitive to moisture factor. Carbon and phosphorus ratio (C/P) was 1.62, which showed strong stability, and did not change with the change of external biological and abiotic environment.

Keywords: water and fertilizer coupling; N/P; C/N; C/P; growth traits; corn

水分和养分是旱地作物生长的主要限制因子,水分不足将影响作物对养分的吸收利用进而影响产量,而养分不足也会限制作物对水分的充分利用导致产量下降^[1]。在水资源匮乏、化肥过量和 CO₂ 浓度不断上升带来的环境负荷越来越严峻的今天,提高作物水分和养分的利用效率、加强水肥耦合关系的研究显得尤为重要,水肥耦合管理技术的研究日益受到重视^[2]。碳氮磷化学计量关系反映元素的平衡与耦合,影响作物的生长发育^[3],是生态相互作用和进化过程中的研究热点。研究植物碳、氮、磷化学计量特征,有助于理解 C、N、P 元素分配规律,理解内稳性特征和生长速率的关系^[4]。目前对生物内稳性理论和生长速率理论的提出、验证和丰富都是基于海洋生物的研究获得,对陆生高等植物的研究还没有得出一致的结论^[5],且国内外对生态化学计量学的研究主要集中在森林和草原生态系统^[6],对农作物的研究较少。生态化学计量学是一种理论、一种思维,也是一种工具,应该向生态学的各个方面渗透,并拓展到不同的生态系统类型^[6]。碳氮磷作为植物细胞结构与功能最为重要的生命元素,随着各生长期生育模式的改变,植物会不断调整体内物质的分配来适应环境的变化。因此,研究不同水肥管理下作物生育期内碳氮磷在不同组织部位化学计量特征,对于揭示植物改变养分策略来适应环境变化有重要意义,并且有助于优化田间水肥管理,实现可持续生产。基于此,本研究以常规旱地作物玉米为研究对象,从个体水平上利用生态化学计量学方法研究玉米不同器官碳氮磷计量特征随水肥因素的变化,并分析了土壤—作物系统生态化学计量学特征的相互关系,对于了解玉米生长发育和水肥管理具有重要的现实意义,同时对理解和应用生态化学计量学理论提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2015 年 3—8 月在西南大学日光温室进行,采取盆栽方式,供试作物为玉米(品种为农大 108),供试土壤为西南大学教学实验农场 0—20 cm 土层土壤。设置水分梯度 3 个(田间持水量的 90%,70%,50%,分别

用 W1、W2、W3 表示),氮肥梯度 3 个(高氮 N1、中氮 N2、低氮 N3,中氮水平为田间正常施肥量),共 9 个处理,分别为 W1N1、W1N2、W1N3、W2N1、W2N2、W2N3、W3N1、W3N2、W3N3,每个处理重复 3 次。试验盆钵由 PVC 管制成,圆柱形,高 20 cm,直径 15 cm。每个盆钵装过 5 mm 筛的风干土样 4 kg。高氮、中氮、低氮处理的施 N 量分别为 0.36,0.24,0.12 g/kg,磷、钾肥用量均为 0.2 g/kg。其中氮肥为尿素(含 N 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%),钾肥为氯化钾(含 K₂O 60%),在播种前一次性施入,各种肥料与土样混合均匀后装进盆钵待用。其余管理措施同常规。

试验开始前土壤基本理化性质为 pH 6.7,土壤有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为 16.8,0.967,0.644,18.1 g/kg,速效磷、速效钾、碱解氮含量分别为 18.4,125,94.8 mg/kg。

1.2 测定方法

在玉米拔节期、抽雄期、灌浆期和成熟期测定其株高、茎粗、地上及地下干物质积累;在玉米每个关键生育期取植株 3 株,从基部剪断,将全部土壤反复过 2 mm 筛,挑出根系,把挑出的根连同附着于根上的土壤用水浸泡,轻轻振荡,20 min 后过 1 mm 筛,并把筛上的根系冲洗干净。所有根系先用根系扫描仪分析(EPSON PERFECTION V700),然后将作物地上部分和根系分别在 105 ℃杀青 30 min,60 ℃下烘干,称干重后缩分研磨,过 0.15 mm 筛备用。土壤风干保存备用。植株和土壤有机碳含量采用日本岛津 TOC—SSM—5000A 碳分析仪,磷含量采用 H₂SO₄—H₂O₂ 双酸消煮—钼锑抗比色法测定,氮含量采用凯氏定氮仪测定^[7]。

1.3 数据处理

生长速率计算公式为: $r = (M_2 - M_1) / t$

式中: r 为生长速率(g/d); M_1 为移栽时的生物量干重(g); M_2 为收获时的总生物干量(g); t 为玉米在盆栽中的生长天数(d)。

不同处理的玉米生长性状各指标、碳氮磷含量及化学计量比的差异性采用一维方差分析;运用相关分析方法分析它们的相关性。所有数据处理在 SPSS

17.0 和 Excel 2007 软件中完成统计分析与制图。

2 结果与分析

2.1 不同水肥条件对玉米生长性状的影响

由表 1 可知,玉米根、茎、叶不同器官干重在不同水肥处理下呈现出基本一致的变化规律:随着施氮量的减少而减少,随着土壤含水量的增加而增加。高水高氮处理下的单株生物量高达 42.09 g(不含穗),低水低氮处理下单株生物量仅有 22.73 g(不含穗)。在高水分条件下,玉米干物质量随着施氮量的增加而增加,而中、低水分条件下高氮和低氮都会在一定程度上增加玉米的干物质量;在同样的施氮水平下,水分越高,则越有利于玉米干物质的积累。高水处理显著提高玉米根、茎、叶的干重,中低水分对根、叶的干重影响差异不显著,但是对茎的干重影响差异达到显著水平,说明茎

部位的生物量积累对水分响应较为敏感。

玉米的株高和茎粗亦表现出一致的变化趋势:高水处理显著提高玉米株高,低水显著降低玉米株高和茎粗。从整个生育期来看,玉米抽雄期以前株高受水肥影响较大。同水分条件时株高随施氮量的不同表现各异,其中水分适宜时施氮量对株高的影响不大,而水分胁迫时施氮量越多,玉米长的越高。在整个生育期,低水分处理显著降低玉米茎粗,而施氮量对其影响不大。除 W1N1 处理显著提高茎粗外,中、高水分处理下各个施氮量水平对茎粗的影响差异不显著。由表 2 可知,玉米根直径、根表面积与根体积对水肥的响应较为复杂,并不是预想的高水高氮有助于提高这些指标的绝对值,甚至水肥处理对根长的影响完全没有差异,还有待进一步研究。

表 1 不同水肥条件下玉米株高、茎粗及各部位干物质积累量的动态变化

生育时期	处理	株高/ cm	茎粗/ mm	地上部分干重/(g·株 ⁻¹)		根干重/ (g·株 ⁻¹)	总干重/ (g·株 ⁻¹)
				叶	茎		
拔节期	W1N1	104.53±2.31a	13.64±0.97a	6.31±0.82a	5.81±0.68a	2.29±0.18ab	14.41±1.43a
	W1N2	94.17±0.90b	11.16±0.35b	5.32±0.51b	4.91±0.63ab	2.38±0.16ab	12.61±1.23ab
	W1N3	89.93±5.89b	10.49±1.00bc	4.97±0.57bc	4.80±1.02ab	2.56±0.39a	12.33±1.97ab
	W2N1	80.37±2.89c	11.02±1.02b	4.10±0.82cd	4.00±0.26bc	2.07±0.43abc	10.17±1.51bc
	W2N2	67.67±2.59de	10.97±0.40b	3.45±0.57d	2.90±0.19cde	1.59±0.28cd	7.94±1.00cd
	W2N3	74.57±5.56cd	10.57±1.26bc	3.36±0.13d	3.05±0.13cd	1.79±0.27bc	8.21±0.43c
	W3N1	64.50±4.30e	8.83±1.07d	2.18±0.50e	2.12±0.47d	1.07±0.44de	5.37±1.32de
	W3N2	53.47±4.52f	9.00±0.62cd	1.71±0.13e	1.77±0.06e	0.87±0.07e	4.35±0.15e
	W3N3	63.23±6.87e	9.74±0.59bcd	2.31±0.62e	2.11±1.26de	1.12±0.52de	5.54±2.40de
抽雄期	W1N1	173.90±8.30a	12.09±0.14a	9.68±1.52a	16.61±2.09a	5.23±0.15a	31.52±3.35a
	W1N2	164.17±13.28ab	11.28±0.83b	8.71±1.09a	15.85±0.42ab	4.62±0.25ab	29.17±2.26ab
	W1N3	165.33±8.45ab	11.00±0.33b	7.70±1.44b	14.38±0.52b	4.33±0.33ab	26.41±2.18bc
	W2N1	145.93±19.61bc	10.93±0.66b	7.21±0.47b	10.90±0.41cd	3.90±0.66abcd	22.01±0.84de
	W2N2	148.57±0.21bc	10.57±0.54bc	7.41±0.56b	11.42±0.89cd	4.19±0.39abcd	23.03±0.45cd
	W2N3	147.57±13.59bc	10.03±0.53cd	6.87±1.09b	12.14±1.04c	4.16±0.39abcd	23.16±1.98cd
	W3N1	131.33±5.02cd	9.86±0.85cd	6.66±1.74b	9.39±0.60de	2.96±0.66bcd	19.02±3.18ef
	W3N2	121.33±5.70d	9.89±0.47cd	5.45±1.10c	7.53±0.25ef	2.49±0.23d	15.46±1.02f
	W3N3	113.33±2.18d	9.47±0.50d	5.54±0.42c	7.16±0.22f	2.71±0.61cd	15.41±0.32f
灌浆期	W1N1	175.23±7.75a	14.58±2.56a	10.55±0.64a	18.74±0.90a	4.59±0.47a	33.88±1.54a
	W1N2	173.83±6.56a	11.72±0.56b	9.21±1.19b	16.83±2.06ab	4.47±0.32a	30.51±3.56ab
	W1N3	165.47±9.74ab	11.46±0.47b	8.46±0.75bc	15.37±2.33b	4.01±0.57abc	27.85±3.60b
	W2N1	150.00±7.46bc	10.92±1.04bc	7.55±0.82cd	11.60±2.32cd	3.10±0.54cd	22.25±3.61c
	W2N2	143.00±17.83cd	10.41±1.11bc	6.99±1.28de	11.70±1.74cd	3.68±0.70abcd	22.37±2.47c
	W2N3	141.20±5.48cd	10.96±0.75bc	8.48±0.10bc	14.28±0.94bc	4.28±0.68ab	27.04±0.37b
	W3N1	129.10±3.10de	10.24±0.53bc	6.84±0.19de	11.19±1.13ce	3.02±0.09cd	21.06±0.94c
	W3N2	123.67±10.13e	8.97±0.30c	6.42±0.37de	10.33±2.26d	2.94±0.82d	19.69±3.11c
	W3N3	114.73±8.04e	9.12±0.67c	6.00±0.24e	10.04±0.63d	3.40±0.38bcd	19.44±0.90c
成熟期	W1N1	164.67±7.98a	12.20±0.58a	11.66±0.30a	23.62±2.26a	6.81±0.77a	42.09±1.60a
	W1N2	162.73±3.54ab	11.82±0.34ab	9.45±0.36b	20.01±1.15b	6.31±0.55ab	35.77±1.55b
	W1N3	158.30±8.32abc	10.72±0.32cd	7.85±0.69c	17.18±0.68bc	5.48±0.43bc	30.52±1.58c
	W2N1	152.87±2.42abc	11.30±0.15abc	7.97±0.35c	15.36±1.61cd	4.24±0.43d	27.57±1.98d
	W2N2	144.70±9.01bc	10.09±0.27de	7.42±0.47cde	14.91±1.56cd	4.13±0.70de	26.46±2.53cd
	W2N3	142.33±16.36cd	10.87±0.34bcd	7.60±1.00cd	15.54±1.97cd	4.79±1.05cd	27.93±3.92cd
	W3N1	125.37±7.56de	9.61±0.58e	7.42±0.98cde	12.43±1.80d	3.93±0.98de	23.77±3.76cd
	W3N2	115.63±17.11e	9.55±1.05e	6.30±1.21de	12.37±2.73d	3.70±0.53de	22.38±4.42d
	W3N3	126.30±12.18de	9.40±0.92e	6.18±0.64e	12.26±1.54d	4.28±0.45d	22.73±2.49d

注:不同小写字母表示处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

表 2 不同水肥条件下玉米根系形态指标的动态变化

生育时期	处理	根长/cm	根表面积/cm ²	根直径/mm	根体积/cm ³
拔节期	W1N1	1229.21±228.35a	421.08±3.68ab	1.11±0.20ab	11.75±2.15a
	W1N2	1391.33±177.23a	451.59±21.82a	1.04±0.08ab	11.72±0.59a
	W1N3	1492.31±229.39a	447.49±53.12a	0.96±0.03ab	10.69±0.90ab
	W2N1	1331.79±43.80a	415.67±37.75ab	0.99±0.06ab	10.35±1.56ab
	W2N2	769.18±196.67b	305.06±64.74c	1.35±0.52a	10.84±5.81ab
	W2N3	1253.32±191.22a	402.58±76.95abc	1.02±0.06ab	10.31±2.45ab
	W3N1	1330.96±244.50a	330.07±84.45bc	0.79±0.14b	6.66±2.76ab
	W3N2	1197.12±59.23a	297.46±57.49c	0.79±0.16b	6.05±2.47b
	W3N3	1191.50±272.14a	303.22±50.76c	0.83±0.19b	6.35±2.15b
抽雄期	W1N1	1109.03±292.67a	592.95±141.04ab	1.71±0.12a	25.33±6.11a
	W1N2	1608.80±109.41a	621.52±26.99a	1.23±0.04a	19.12±0.50ab
	W1N3	1243.28±510.76a	545.52±81.36ab	1.55±0.56a	20.38±3.88ab
	W2N1	1025.44±54.96a	516.77±11.65ab	1.61±0.05a	20.74±0.34ab
	W2N2	1550.22±138.56a	593.91±62.83ab	1.22±0.02a	18.11±2.23ab
	W2N3	1439.78±121.86a	598.04±80.79a	1.33±0.20a	20.07±5.22ab
	W3N1	1020.16±311.26a	507.65±32.70ab	1.69±0.53a	21.64±7.38ab
	W3N2	1222.00±467.21a	459.23±49.00b	1.27±0.31a	14.38±2.13b
	W3N3	1494.75±391.57a	516.97±54.02ab	1.14±0.22a	14.53±1.57b
灌浆期	W1N1	1638.02±95.72ab	553.35±24.86a	1.08±0.05a	14.90±1.13a
	W1N2	1768.85±51.20a	552.21±4.36a	0.99±0.04ab	13.73±0.61ab
	W1N3	1524.79±237.11ab	496.83±71.34abc	1.04±0.08ab	12.93±2.10ab
	W2N1	1466.79±79.51b	431.98±45.15c	0.94±0.11ab	10.21±2.09b
	W2N2	1678.17±210.17ab	508.46±23.35abc	0.97±0.10ab	12.34±1.22ab
	W2N3	1747.12±52.68ab	527.72±73.64ab	0.96±0.13ab	12.83±3.43ab
	W3N1	1505.56±183.13ab	440.57±29.89bc	0.94±0.11ab	10.35±1.42b
	W3N2	1589.08±88.92ab	465.69±49.71bc	0.94±0.14ab	11.02±2.67ab
	W3N3	1704.62±184.60ab	456.68±53.18bc	0.86±0.12b	9.86±2.14b
成熟期	W1N1	1344.88±487.41a	536.90±60.62ab	1.38±0.46a	18.11±4.06a
	W1N2	1650.19±217.87a	600.75±50.31a	1.16±0.06ab	17.43±0.73ab
	W1N3	1313.32±157.98a	488.67±9.71ab	1.19±0.13ab	14.58±1.41abcd
	W2N1	1631.67±218.48a	507.26±59.34ab	0.99±0.04ab	12.56±1.38bcd
	W2N2	1487.40±178.09a	449.06±4.42b	0.97±0.12b	10.89±1.32cde
	W2N3	1418.07±309.83a	527.99±112.47ab	1.20±0.24ab	16.01±4.95abc
	W3N1	1663.19±436.20a	484.85±137.72ab	0.93±0.13b	11.38±3.88cde
	W3N2	1706.39±42.02a	467.24±27.48b	0.87±0.03b	10.19±0.98de
	W3N3	1490.23±208.19a	532.69±46.03ab	1.16±0.25ab	15.59±4.39abcd

2.2 不同水肥条件对玉米氮磷含量的影响

2.2.1 不同水肥处理下玉米根茎叶氮含量变化 玉米根、茎、叶的氮含量平均依次为 11.51, 13.35, 22.94 g/kg。随着生育期的推进各部位的氮含量呈下降趋势(表 3),其中根氮含量从拔节期的 13.61 g/kg 下降到 9.99 g/kg,茎和叶的氮含量的变化范围分别为 21.89~9.36, 28.22~16.80 g/kg,三者各自下

降了 26.60%, 57.24%, 40.47%。低氮施肥下玉米根、茎、叶的氮含量显著低于中、高氮施肥。同一水分梯度下中、高氮施肥对根氮含量的影响差异不显著;但显著影响茎氮含量,且除了抽雄期以外土壤水分越高,越不利于氮元素向茎部位的转移;对叶氮含量的影响则在抽雄期以后才达到显著水平,且抽雄期以后土壤水分越高,叶氮含量越少。随着土壤水分含量增

加,根氮含量呈现减少的趋势,说明土壤水分含量超过一定范围会抑制玉米根系吸收利用氮素的能力。

2.2.2 不同水肥处理下玉米根茎叶磷含量变化 根、茎、叶的磷含量在玉米整个生育期依次为 1.81,2.97,3.19 g/kg,根磷<茎磷<叶磷。随着生育期的推进,根

和茎的磷含量呈下降趋势,而叶的磷含量有上升趋势,从拔节期到成熟期根磷含量下降了 3.89%,茎、叶的磷含量分别下降了 12.96%,3.05%。不同水氮处理对玉米不同生育期根茎叶的磷含量有一定的影响(表 4),但是无规律可循,这部分还有待进一步研究。

表 3 不同水肥处理对玉米不同时期根茎叶氮含量的影响 单位:g/kg

部位	生育期	W1N1	W1N2	W1N3	W2N1	W2N2	W2N3	W3N1	W3N2	W3N3
根	拔节期	12.96±1.18b	13.16±1.49b	8.60±0.75c	15.54±0.82a	16.33±1.34a	11.40±1.28b	16.83±0.92a	16.05±0.50a	11.66±0.74b
	抽雄期	13.08±1.38bc	9.24±0.71c	8.23±0.96c	14.54±0.67ab	13.37±1.08bc	8.67±0.64c	15.42±0.64a	14.75±1.03ab	12.55±0.97c
	灌浆期	11.52±0.54b	8.77±1.25c	8.19±0.61cd	14.38±0.51a	11.92±1.45b	7.22±1.45d	11.95±1.38b	11.69±1.19b	6.56±1.39d
	成熟期	8.76±1.47c	7.81±0.70cd	6.66±1.18c	13.17±0.60ab	11.47±1.22b	8.25±1.22cd	14.12±1.41a	11.49±0.56b	8.19±0.77cd
茎	拔节期	21.91±1.26c	19.17±0.92d	13.49±1.09e	24.22±0.93b	25.39±1.02b	18.88±0.85d	27.50±1.38a	27.21±0.63a	19.25±0.73d
	抽雄期	14.33±1.29ab	10.75±0.93c	6.54±1.39d	10.84±0.86c	14.72±1.47ab	8.09±1.25d	16.17±1.25a	15.73±0.66a	13.33±1.17b
	灌浆期	10.23±0.88b	7.59±0.80c	5.83±1.22c	14.70±0.85a	10.90±0.93b	5.87±0.79c	11.01±0.62b	11.09±0.79b	6.98±1.42c
	成熟期	10.28±0.60b	7.68±0.55cd	5.72±1.02e	13.84±0.74a	11.27±1.19b	6.33±0.66de	13.55±1.38a	11.71±0.57b	8.51±0.85cd
叶	拔节期	29.75±0.63a	28.39±0.55ab	23.00±1.34d	29.51±1.37ab	30.01±1.01a	27.64±0.90bc	30.06±1.01a	29.86±1.33a	25.80±1.37c
	抽雄期	26.62±1.07abc	24.97±0.59c	16.87±0.80e	27.50±0.88ab	28.33±1.40a	19.41±0.95d	26.29±1.36bc	27.93±0.63ab	25.27±0.53c
	灌浆期	24.38±0.69b	22.50±0.63c	15.91±0.76e	26.53±1.15a	23.83±1.36bc	12.96±0.69f	24.91±0.90ab	26.66±1.28a	19.62±1.47d
	成熟期	14.93±1.08d	10.34±0.68e	9.35±0.59e	26.70±0.96a	21.67±0.83b	13.49±1.12d	21.77±1.16b	19.46±0.73c	13.52±0.92d

注:不同小写字母表示不同处理同一个生育期玉米根、茎、叶氮含量差异显著($p<0.05$)。

表 4 不同水肥处理对玉米不同生育期根茎叶磷含量的影响 单位:g/kg

部位	生育期	W1N1	W1N2	W1N3	W2N1	W2N2	W2N3	W3N1	W3N2	W3N3
根	拔节期	1.61±0.15cde	2.02±0.22ab	1.40±0.14e	1.58±0.23de	2.12±0.22a	2.08±0.05a	1.93±0.13abc	1.71±0.07bcde	1.74±0.25bcd
	抽雄期	1.93±0.19ab	1.67±0.10bc	1.66±0.09bc	2.17±0.11a	1.80±0.16b	1.45±0.22c	1.96±0.17ab	1.93±0.16ab	1.83±0.23b
	灌浆期	2.06±0.25ab	1.95±0.21ab	2.15±0.24ab	1.70±0.14bc	1.87±0.15abc	2.12±0.08a	1.55±0.19c	2.06±0.23ab	1.59±0.16c
	成熟期	1.59±0.24a	1.66±0.17a	1.82±0.23a	1.60±0.06a	1.92±0.24a	1.74±0.25a	1.69±0.16a	1.67±0.08a	1.90±0.19a
茎	拔节期	2.80±0.17e	2.93±0.22de	3.04±0.16cde	3.07±0.23cde	3.82±0.08a	3.30±0.24bc	3.15±0.21cd	3.59±0.06ab	3.48±0.11b
	抽雄期	3.05±0.19ab	2.89±0.07ab	2.80±0.17ab	2.97±0.13ab	2.88±0.23ab	2.75±0.08b	2.91±0.12ab	2.83±0.20ab	3.10±0.24a
	灌浆期	2.78±0.15b	2.80±0.05b	3.34±0.23a	3.30±0.15a	2.81±0.25b	2.66±0.13b	2.74±0.07b	2.96±0.06b	2.85±0.23b
	成熟期	2.91±0.17ab	2.38±0.09c	2.91±0.22ab	2.72±0.12b	3.06±0.22a	2.92±0.22ab	2.67±0.20b	2.77±0.11ab	3.09±0.08a
叶	拔节期	3.36±0.13a	2.96±0.18bc	2.91±0.20bc	2.81±0.11c	3.17±0.17ab	2.90±0.22bc	2.74±0.12c	2.87±0.08c	2.79±0.13c
	抽雄期	3.57±0.17d	3.52±0.08d	2.25±0.13f	3.65±0.16d	3.85±0.13bc	2.92±0.24e	3.98±0.11b	4.34±0.17a	3.76±0.06bcd
	灌浆期	3.65±0.09ab	3.19±0.14c	2.68±0.23d	3.93±0.06a	3.57±0.13b	2.74±0.16d	3.36±0.21bc	3.42±0.21bc	2.74±0.24d
	成熟期	2.57±0.21cd	3.47±0.06b	2.37±0.14d	3.84±0.24a	3.32±0.24b	2.58±0.15cd	3.23±0.09b	3.27±0.20b	2.67±0.17cd

注:不同小写字母表示不同处理同一个生育期玉米根、茎、叶磷含量差异显著($p<0.05$)。

2.3 玉米 C、N、P 化学计量学特征对不同水肥条件的响应

玉米不同组织器官的 N/P 大小依次为叶>根>茎,叶片 N/P 为 5.47~9.61,根为 5.52~7.62,茎为 3.21~6.77。同一器官组织的 N/P 均随着生育期的推进呈递减趋势(图 1),不同生育期各处理下植株 N/P 平均为拔节期 8.00、抽雄期 5.96、灌浆期 5.14 和成熟期 4.93。不同水肥处理下植株 N/P 依次为 6.21(W1N1)、5.35(W1N2)、4.53(W1N3)、7.18(W2N1)、6.40(W2N2)、4.90(W2N3)、7.32(W3N1)、6.77(W3N2)、5.44(W3N3),平均值 6.01,可见玉米 N/P 随着施氮量的增加而升高,

随土壤含水量的增加而降低。

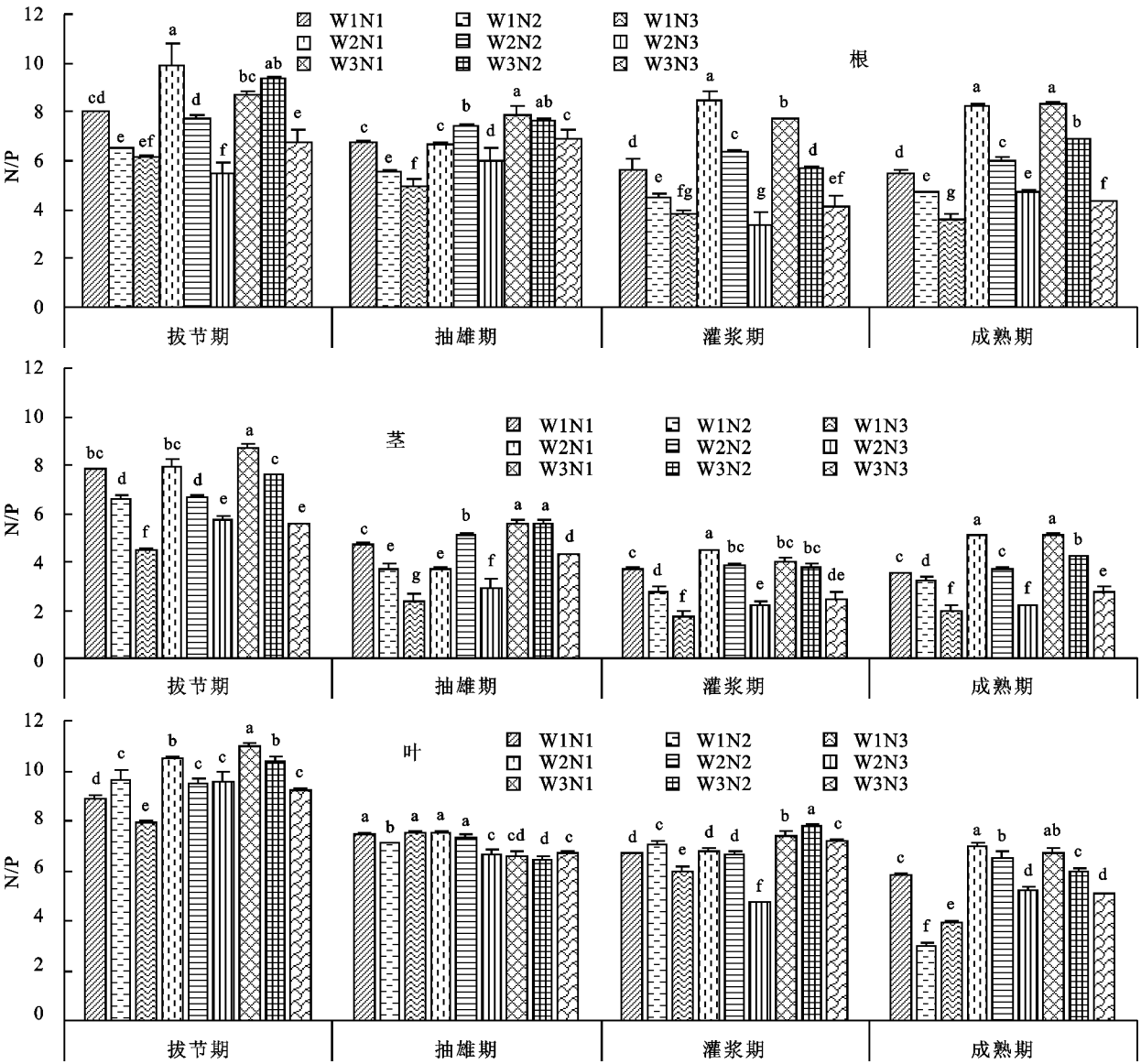
不同组织器官的 C/N 大小为叶最小,介于 0.15~0.26,平均为 0.18,根茎的 C/N 除了茎在拔节期较低外(平均为 0.19)其他生育期相差不多,介于 0.31~0.47,平均为 0.37。C/N 随着生育期的推进呈增加的趋势(图 2),不同生育期各处理下植株 C/N 平均为拔节期 0.22、抽雄期 0.29、灌浆期 0.36 和成熟期 0.37。不同水肥处理下植株 C/N 依次为 0.28(W1N1)、0.35(W1N2)、0.46(W1N3)、0.23(W2N1)、0.25(W2N2)、0.40(W2N3)、0.23(W3N1)、0.25(W3N2)、0.34(W3N3),平均值 0.31。玉米 C/N 随着施氮量的增加而降低,高水分

下 C/N 显著高于中低水分。

玉米不同组织器官的 C/P 大小为根最大,介于 2.09~2.28,平均值为 2.22。茎叶相差不多为 1.18~1.41,平均值为 1.32。同一部位的 C/P 随着生育期的推进无显著变化(图 3),不同生育期各处理下植株 C/P 平均为拔节期 1.64、抽雄期 1.60、灌浆期 1.57 和成熟期 1.67。不同水肥处理下植株 C/P 相差不多,依次为 1.63(W1N1),1.63(W1N2),1.78(W1N3),1.58(W2N1),1.51(W2N2),1.65(W2N3),1.62(W3N1),1.57(W3N2),1.62(W3N3),平均值 1.62。总之,玉米植株 C/P 表

现出强烈的内稳性,不随外界生物与非生物环境的变化而变化。

总之,随着施氮量的增加,玉米根茎叶的 N/P 均有显著提高,而随着土壤含水量增加则显著降低,进一步验证了高土壤水分抑制作物氮素的吸收利用。随着施氮量的增加,玉米根茎叶的 C/P 和 C/N 有不同的变化规律,其中叶 C/P 呈下降趋势,茎 C/P 变化不大,根 C/P 在灌浆期以前呈下降趋势,灌浆期以后又呈现上升的趋势;根茎叶的 C/N 随着施氮量的增加变化规律一致,均呈现出下降的趋势。



注:不同小写字母表示玉米同一部位同一个生育期不同处理玉米根、茎、叶氮磷比差异显著($p<0.05$)。

图 1 不同水肥处理对玉米不同生育期根茎叶氮磷比的影响

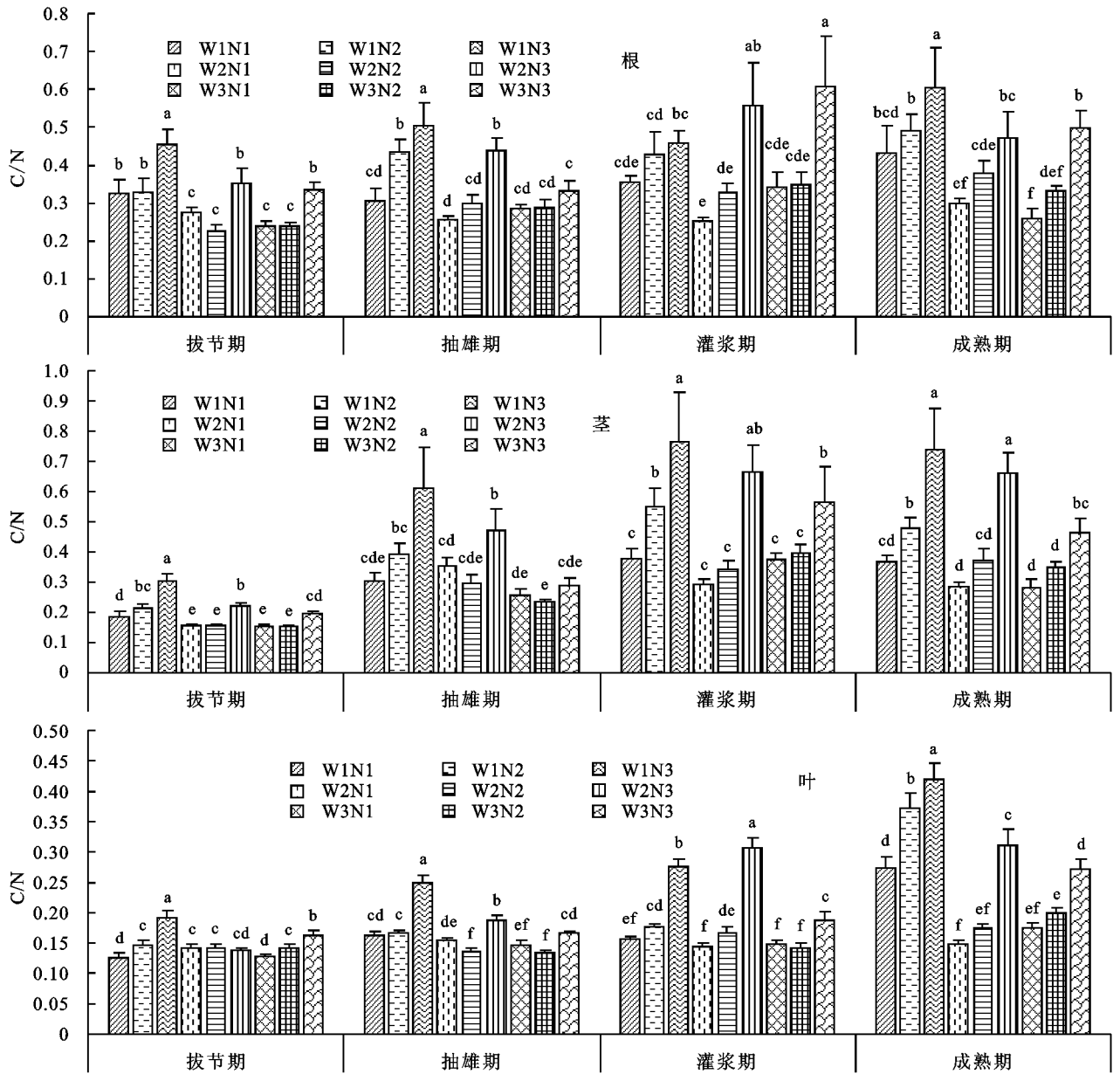
2.4 玉米 C、N、P 化学计量学特征与生长性状的关系

由表 5 可知,玉米 C 含量与 N 含量、P 含量及各生长指标无显著相关性,主要是因为碳是植物最基本的元素,植物具有稳定的碳组成和结构基础,C 含量

在玉米不同器官组织和不同生育期基本一致。玉米 N 含量与植株 P 含量、植株 N/P 呈显著正相关,与植株 C/N、植株 C/P、土壤 N 含量、土壤 C/N、土壤 N/P 以及株高、根长、根表面积呈显著负相关。玉米 P 含量与植株 N/P 呈显著正相关,而与植株 C/N、植株

C/P、土壤 N 含量、土壤 C/N、土壤 N/P 呈显著负相关。这一结论正说明了氮磷元素在土壤—作物系统迁移转化,两个系统必然是此消彼长的关系。玉米植株 C/N、植株 C/P 都与植株 N/P 显著负相关,而与

土壤 N 含量、土壤 C/N、土壤 N/P 呈显著正相关。玉米植株 N/P 与土壤 P 含量呈正相关关系,与其余各指标呈负相关关系,其中与株高、根表面积、土壤 N 含量、土壤 C/N、土壤 N/P 达到显著水平。



注:不同小写字母表示玉米同一部位同一个生育期不同处理玉米根、茎、叶碳氮比差异显著($p < 0.05$)。

图 2 不同水肥处理对玉米不同生育期根茎叶碳氮比的影响

3 讨论

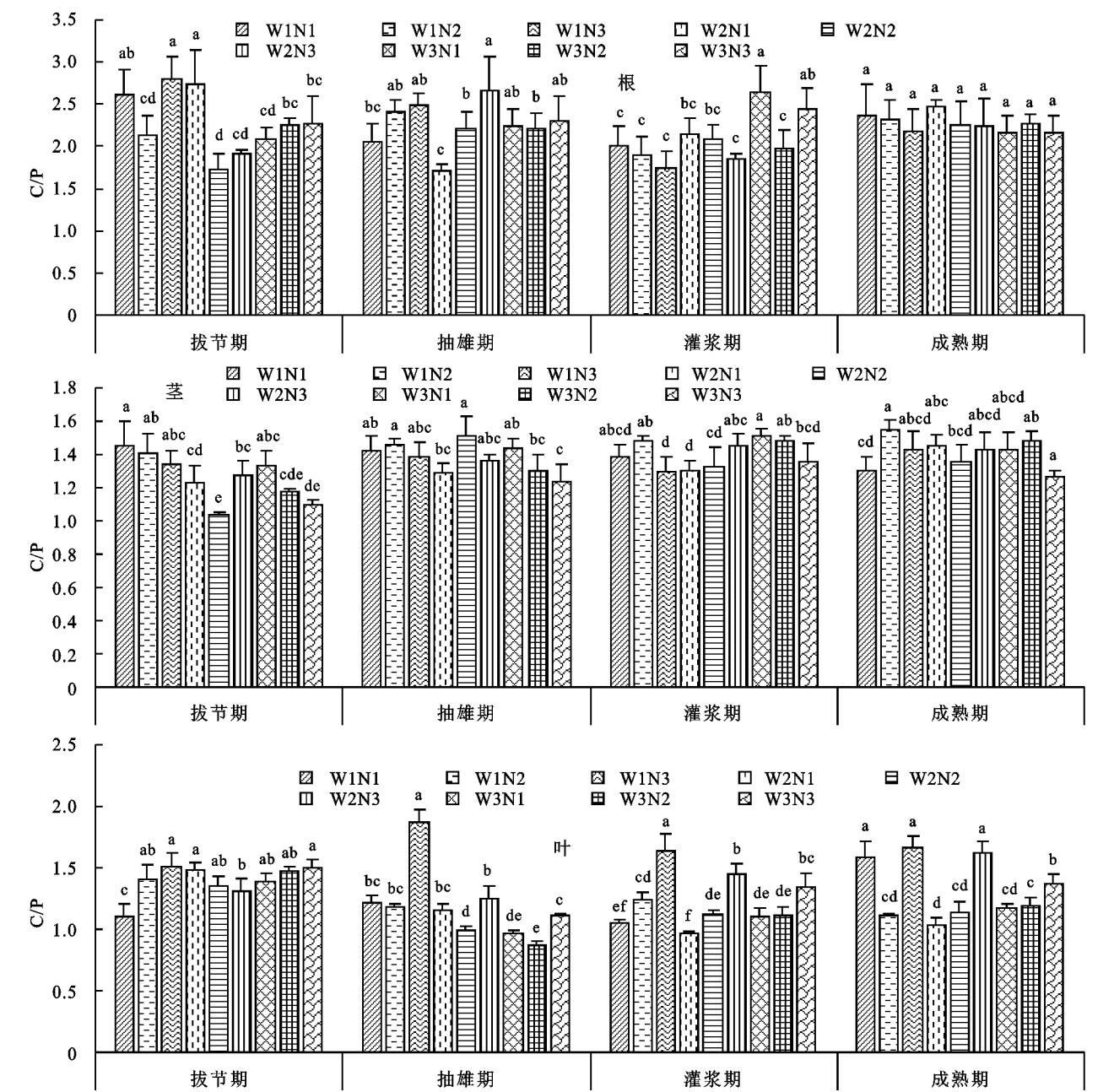
3.1 水肥耦合对玉米生长发育和碳氮磷含量的影响

本研究中水肥耦合对玉米生长发育的影响主要体现各器官干物质积累量、株高和茎粗上,对玉米根长没有影响,可能是因为试验是在盆栽中进行的,不像自然环境下根系可以向土壤深层延伸;对地下部分根的形态指标影响较为复杂,还需进一步研究。有研究^[8]表明,轻度水分胁迫时氮素对作物根系的生长发育有明显的促进作用,严重水分胁迫时施氮肥会引起根水势下降,导致根干重和根体积明显减小。张凤翔

等^[9]在土培条件下研究水肥耦合对水稻不同生育阶段根系形态与活力的影响,结果表明,在低土壤水分条件下增加氮素供应水平能够显著增加根干重、根体积和促进根系的深扎。华元刚等^[10]研究认为,水分充足时增施氮肥促进根系生长,而土壤相对干旱时根系生长加快,向土壤深层伸长以获得更多水分。过高的施肥量抑制植株的生长,植株干物质积累量、叶片光合速率以及产量均受到影响^[11]。本研究高氮下玉米的生长没有受到限制,可能是因为当前试验条件下高氮施肥处理的标准还未达到抑制作物生长的量。

水分适宜时较低的施肥量便能提高玉米干物质积累、株高和茎粗,说明水氮互作效应显著影响作物的生

长,但是具体的施氮量和土壤水分含量还需要进一步的研究,水肥耦合的内在机制仍需要深入的探讨。



注:不同小写字母表示玉米同一部位同一个生育期不同处理玉米根、茎、叶碳磷比差异显著($p < 0.05$)。

图 3 不同水肥处理对玉米不同生育期根茎叶碳磷比的影响

玉米不同生育期各组织氮磷含量呈现不一致的变化趋势,根和茎的氮磷含量随生育期下降,表明受玉米生育晚期植株老化的影响,氮磷转移到叶部位或者籽粒上,有助于植株生殖器官的发育和形成。营养器官的氮磷含量随植株生长而下降的规律不仅存在于玉米中,而且也存在于其他农作物,如水稻、小麦、大豆等^[12]。这种现象是由植物生物量积累、植株体积增大所产生的稀释效应而引起的^[13]。玉米不同生育期、不同组织氮磷含量对水肥处理的响应不同,表明水肥供应在玉米作物氮磷状态调节方面起着重要作用。但是植株碳

含量受水肥因素的影响较小,主要是因为碳是植物最基本的元素,植物具有稳定的碳组成和结构基础,C含量在玉米不同器官组织和不同生育期基本一致。这跟以往学者的研究结论一致,Yan等^[14]研究认为,不同施肥处理下小麦各器官的碳含量之间没有差异;不同保护性耕作措施对小麦、玉米植株碳含量影响都不大^[7,15]。但是,也有研究^[16]表明,长期施肥对玉米不同器官碳含量及分配比例有显著影响。究其原因,可能与试验年限有关,短期试验下植株碳含量相对稳定,从长远看施肥等处理则会影响植株碳含量。

表 5 玉米碳氮磷含量及化学计量学特征与相关指标的相关性

指 标	C	N	P	C/N	C/P	N/P
C	1.000					
N	−0.656	1.000				
P	−0.008	0.565*	1.000			
C/N	0.558	−0.962**	−0.596*	1.000		
C/P	0.289	−0.617**	−0.890*	0.590*	1.000	
N/P	−0.727	0.965**	0.340*	−0.921**	−0.416*	1.000
作物	<i>r</i>	0.403	−0.207	−0.098	0.116	−0.206
	株高	0.851	−0.663*	−0.095	0.583*	−0.716**
	茎粗	0.037	−0.120	−0.004	0.106	0.000
	根长	0.454	−0.505*	−0.328	0.428	0.405
	根表面积	0.751	−0.625*	−0.178	0.526*	0.371
	根直径	0.314	−0.113	0.155	0.087	−0.037
	根体积	0.559	−0.358	0.010	0.295	0.159
土壤	C	0.304	−0.160	0.129	0.135	−0.038
	N	0.193	−0.469*	−0.535*	0.508*	0.515*
	P	−0.225	0.000	−0.158	0.039	−0.036
	C/N	0.263	−0.508*	−0.451*	0.529*	0.435*
	C/P	0.115	−0.097	−0.057	0.098	0.030
	N/P	0.233	−0.481*	−0.529*	0.533*	0.517*

注：C、N、P 含量单位为 g/kg；株高单位为 cm；根长、根直径单位为 mm；根表面积单位为 cm²；根体积单位为 cm³；*r* 单位为 g/d；* 表示 $p < 0.05$ ；** 表示 $p < 0.01$ 。

3.2 水肥耦合对玉米碳氮磷化学计量学特征的影响

本研究结果显示玉米 N/P 随着施氮量的增加而升高,随土壤含水量的增加而降低。玉米 C/N 随着施氮量的增加而降低,对水分因素不敏感。玉米植株 C/P 则表现出强烈的内稳性,不随外界生物与非生物环境的变化而变化。植物 C、N、P 化学计量特征反映了植物对水肥胁迫等不利环境的防御和适应策略^[17],受到生物因素(如物种、种群、个体、生长阶段等)和非生物因素(如温度、光照、土壤水分和养分、土壤利用、耕作措施等)的综合影响^[18]。本研究表明,玉米 C、N、P 化学计量学特征与植物碳氮含量、土壤碳氮含量以及植物本身的形态指标存在一定的相关关系,这些指标正是受到了不同水肥管理而发生变化,因此间接证明了玉米碳氮磷化学计量关系受水肥因素的影响。植物叶片 N、P 含量越高,表明其光合速率越高,生长速率越快,资源竞争能力越强^[19]。在 C、N、P 化学计量关系中有关 N/P 的研究最多,应用也最广泛,主要是因为 N/P 反映植物组织中富含氮的蛋白质和富含磷的 RNA 二者的相对生化制约关系^[20]。N/P 具有很高的养分限制诊断价值,Güsewell^[3] 提出陆生植物最佳 N/P 在 10~20,全球尺度上植被叶片 N/P 均值为 11.8^[19]。叶玉适^[2] 总结了主要谷类作物的关键 N/P 介于 4~6,本研究中玉米不同部位 N/P 比范围不同,分别为叶片为 7.20,根为 6.40,茎为 4.23。

有学者^[6]认为,叶片对氮和磷养分缺乏的适应可以体现在叶片 N/P 的变化上,因此将 N/P 作为限制性养分判断的指标之一,但是不同的研究结果证明了该指标的敏感性和适用性往往会因研究对象不同而不同,因此其内在机制还需要进一步研究。Liebig 最小因子定律认为植物体存在一个关键 N/P,对于氮磷肥施用量分别为多少时才能达到不同作物的最佳 N/P 仍需开展大量的研究工作。

4 结 论

玉米根、茎、叶不同器官干物质质量均随着施氮量的减少而减少,随着土壤含水量的增加而增加。高水处理显著提高玉米株高,低水显著降低玉米株高。高、中水分时玉米株高随着施氮量的增加而增加,当玉米处于干旱胁迫时施氮量对玉米株高影响不大。低水分下的茎粗显著低于高、中水分。

玉米根、茎、叶的 C 含量依次为 39.522%,40.141%,39.698%,各部位差异不显著。根、茎、叶的 N 含量依次为 11.51,13.35,22.94 g/kg,随着生育期的推进各部位的氮含量均呈下降趋势。根、茎、叶的 P 含量为 1.81,2.97,3.19 g/kg,随着生育期的推进,根和茎的磷含量呈下降趋势,而叶的磷含量呈上升趋势。低氮施肥处理下玉米根、茎和叶的氮含量均显著低于中、高氮处理,而后两者对根、茎和叶的氮

含量的影响表现不一,其中对茎氮含量差异达到显著水平,对叶氮含量在抽雄期以后才显著。

玉米 C、N、P 生态化学计量特征随水肥因素的变化表现不一,其中 N/P 平均为 6.01,随着施氮量的增加而升高,随土壤含水量的增加而降低;C/N 为 0.31,随着施氮量的增加而降低,对水分因素不敏感;C/P 为 1.62,表现出强烈的内稳性,不随外界生物与非生物环境的变化而变化。

参考文献:

- [1] Gonzalez-Dugo V, Durand J L, Gastal F. Water deficit and nitrogen nutrition of crops: A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30: 529-544.
- [2] 叶玉适. 水肥耦合管理对稻田生源要素碳氮磷迁移转化的影响[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [3] Güsewell S. N : P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, 164(2):243-266.
- [4] 杨梅,王昌全,袁大刚,等. 不同生长期烤烟各器官 C、N、P 生态化学计量学特征[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(6):686-693.
- [5] 严正兵,金南瑛,韩廷申,等. 氮磷施肥对拟南芥叶片碳氮磷化学计量特征的影响[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(6):551-557.
- [6] 曾冬萍,蒋利玲,曾从盛,等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(18):5484-5492.
- [7] 张赛,王龙昌,黄召存,等. 保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(6):2419-2425.
- [8] 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):105-109.
- [9] 张凤翔,周明耀,周春林,等. 水肥耦合对水稻根系形态与活力的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(5):197-200.
- [10] 华元刚,罗微,林钊沐,等. 水肥耦合对橡胶树根系垂直分布的影响[J]. *热带作物学报*, 2012, 33(8):1342-1347.
- [11] 李邵,薛绪掌,郭文善,等. 水肥耦合对温室盆栽黄瓜产量水分利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2):376-381.
- [12] Dordas C. Dry matter, nitrogen and phosphorus accumulation, partitioning and remobilization as affected by N and P fertilization and source-sink relations [J]. *European Journal of Agronomy*, 2009, 30: 129-139.
- [13] Zhang H Y, Wu H H, Yu Q, et al. Sampling date, leaf age and root size: Implications for the study of plant C : N : P stoichiometry [J]. *PLoS One*, 2013, 8: e60360.
- [14] Yan W, Zhong Y, Shanguan Z. The relationships and sensibility of wheat C : N : P stoichiometry and water use efficiency under nitrogen fertilization [J]. *Plant and Soil Environment*, 2015, 61 (5): 201-207.
- [15] 张赛,王龙昌,周航飞,等. 西南丘陵区不同耕作模式下玉米田土壤呼吸及影响因素分析[J]. *生态学报*, 2014, 34(21):6244-6255.
- [16] 苗惠田,张文菊,吕家珑,等. 长期施肥对潮土玉米碳含量及分配比例的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(23):4852-4861.
- [17] 王凯博,上官周平. 黄土丘陵区燕沟流域典型植物叶片 C、N、P 化学计量特征季节变化[J]. *生态学报*, 2011, 31(17):4985-4991.
- [18] Yu Q, Wu H H, He N P, et al. Testing the growth rate hypothesis in vascular plants with above- and below-ground biomass [J]. *PLoS One*, 2012, 7:e32162.
- [19] 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 Sciences of the United States of America*, 2004, 101: 11001-11006.
- [20] Agren G I. The C : N : P stoichiometry of autotrophs-theory and observation [J]. *Ecology Letters*, 2004, 7: 185-191.
- [17] Kielland K, Mcfarland J W, Ruess R W, et al. Rapid cycling of organic nitrogen in taiga forest ecosystems [J]. *Ecosystems*, 2007, 10(3): 360-368.
- [18] 张玉玲,陈温福,虞娜,等. 东北地区滨海盐渍土型稻田土壤有机氮组分的研究[J]. *土壤通报*, 2012, 43(5): 1167-1172.
- [19] Rovira P, Vallejo V R. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: An acid hydrolysis approach [J]. *Geoderma*, 2002, 107(1/2): 109-141.
- [20] Li L L, Li S T. Nitrogen mineralization from animal manures and its relation to organic N fractions [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(9): 2040-2048.
- [21] 李响,何红波,张威,等. 外源无机氮素形态对土壤氨基糖动态的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(5):1153-1158.

(上接第 251 页)