

塔里木河上游绿洲农田不同生育期玉米根茎叶 生态化学计量特征

罗艳^{1,2}, 贡璐^{1,2}, 李杨梅^{1,2}

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 研究绿洲农田玉米生态化学计量特征可揭示玉米对环境变化的响应, 为绿洲农田生态系统的优化管理与绿洲资源的保护提供理论依据。以塔里木河上游绿洲农田玉米为研究对象, 分析了不同生育期根、茎、叶的碳(C)、氮(N)、磷(P)化学计量特征。结果表明: 玉米 C, N, P 含量均值分别为 311.97, 16.41, 2.54 mg/g。玉米各器官 C, N 含量均表现为叶>茎>根, P 表现为茎>叶>根, C:N 和 C:P 比值大小顺序均为叶>根>茎, N:P 则为叶>茎>根。不同生育期玉米叶的 C 含量在拔节期最高, 茎的 C 含量无显著差异, 根的 C 含量是拔节期显著低于其他 3 个生育期; 拔节期叶和茎的 N 元素含量显著高于其他生育期, 根的 N 含量无显著差异; 乳熟期叶的 P 含量显著高于其他 3 个生育期, 乳熟期茎的 P 含量最低, 成熟期根的 P 含量最高; 成熟期玉米叶的 C:N 显著高于其他生育期, 乳熟期根和茎的 C:P 均显著高于其他生育期, 乳熟期叶的 N:P 显著低于其他生育期, 成熟期根和茎的 N:P 显著低于其他生育期。各生育期中叶片所对应的 N:P 小于 14, 可知玉米生长更易受 N 元素限制。GLM 分析表明, 生育期对 P, C:N 和 C:P, 生境对 C, N 和 N:P 的影响最大。

关键词: 玉米; 生态化学计量学; 生育期; 器官; 塔里木河上游

中图分类号: Q946

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)02-0112-08

Stoichiometry Characteristics of Root, Stem and Leaf of Maize in Different Growth Stages in the Upper Reaches of the Tarim River

LUO Yan^{1,2}, GONG Lu^{1,2}, LI Yangmei^{1,2}

(1. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi 830046, China)

Abstract: The main purposes of this study were to reveal the adaptation mechanism of maize to environment change in oasis farmland, to provide scientific basis for optimal management of oasis farmland ecosystem and protection of oasis resources. We took maize of oasis farmland in the upper reaches of the Tarim River as the sites. The chemical characteristics of carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) in roots, stems and leaves of different growth stages were analyzed. The results showed that the mean contents of C, N and P were 311.97, 16.41 and 2.54 mg/g, respectively. The the mean contents of C, N in maize organs decreased in the order: leaves>stems>roots, and P in maize decreased in the sequence: stems>leaves>roots, the changes in C:N and C:P ratios followed the order: leaves>roots>stems, whereas the change in N:P follow the sequence: leaves>stems>roots. The contents of C, N, P and their ecological stoichiometry ratios in roots, stems and leaves were significantly different among four growth stages. By comparison and analysis, the content of C in leaf was significantly higher at jointing stage than other growth stages; C content of stem was not significantly different at different growth stages; C content of root was significantly lower than other growth stages. The contents of N in leaf and stem were significantly higher at jointing stage than other growth stages; while the content of N in root was not significantly different. P content of leaf was signifi-

cantly higher at milking stage than other growth stages, while P content of stem was significantly lower at milking stage than other growth stages, the content of P in root was significantly higher during maturation stage. The C : N ratio in leaf at maturation stage was significantly higher than other growth stage, the C : P ratios of stem and root at milking stage were significantly higher than other growth stage, compared with other ratios, the N : P ratio of leaf was significantly lower at milking stage than other growth stages, the N : P ratios of stem and root were significantly lower at maturation stage than other growth stage. The ratio of N : P was less than 14, which indicated that the growth of maize was mainly limited by N. According to the factorial analysis of GLM, it was concluded that growth stages and organs had certain influences on the contents of C, N and P and the ratios. It showed that the content of P, the ratios of C : N and C : P were mainly depended on the growth stages, the contents of C, N and the ratio of N : P were mainly determined by the organs.

Keywords: maize; stoichiometry; growth stage; organ; the upper reaches of the Tarim River

绿洲是干旱区人类社会存在和发展的基础,农田生态系统则是绿洲中最重要的组成部分^[1]。农田生态系统是以作物为中心的农田生物与其生态环境相互作用所构成的具有一定功能和自然调节机制的人工生态系统,碳(C)、氮(N)、磷(P)元素循环和平衡是其基本的功能和生产力状况的反映^[2]。C,N,P作为作物生长发育所必需的营养元素,其含量及其比值平衡关系对作物生长和生理机能的调节发挥着非常重要的作用。生态化学计量学是研究生态过程和生态作用中多重化学元素平衡的科学,为探究农田生态系统中C,N,P等元素的利用状况和生物地球化学循环提供了一个很好的研究手段^[2-3]。当前国内外学者对绿洲农田生态系统的研究主要集中于生态系统服务功能和价值等的方面,对其生态化学计量特征的研究,尤其是针对极端干旱区绿洲农田作物生态化学计量特征的研究尚显不足^[3-6]。开展绿洲农田作物器官元素分配及其生育期生态化学计量特征变化的研究,以期揭示施肥对作物生长策略的影响。这对农田生态系统的健康发展以及绿洲土地资源的可持续利用具有重要意义。

阿克苏绿洲地处塔里木河上游、塔克拉玛干沙漠北缘,是我国生态环境变化敏感和生物多样性保护区,对以人类活动为主的区域土地资源的开发反应强烈^[1]。绿洲内高强度的水土资源开发、不合理的灌溉开垦方式,使得该区域生物多样性低,植物稀疏,土壤盐渍化严重^[3-7]。玉米作为耐旱的高产农作物^[8],是阿克苏绿洲主要的经济作物之一。本文通过对塔里木河上游阿克苏绿洲阿拉尔垦区不同生育期玉米根茎叶各器官生态化学计量特征的研究,系统分析不同生育期玉米C,N,P元素含量及其化学计量比的分异规律,旨在揭示玉米在各生育期对环境变化的响应,为玉米的科学施肥提供一定的理论依据,补充绿洲农

田作物在生态化学计量学领域中的研究成果,以期为绿洲农田生态系统的优化管理与绿洲资源的保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于塔里木河上游阿拉尔垦区,新疆生产建设兵团第一师十一团内,地处天山中段南麓、塔克拉玛干沙漠北缘,地理位置跨东经 $80^{\circ}30'$ — $81^{\circ}58'$,北纬 $40^{\circ}22'$ — $40^{\circ}57'$,平均海拔为1 012 m。该区处于塔里木盆地的北缘,属暖温带极端大陆性干旱荒漠气候,昼夜温差大,年均气温在 $9.9\sim 11.5^{\circ}\text{C}$;气候干燥,降水稀少,年均降水量 $17.4\sim 42.8\text{ mm}$;蒸发强烈,年均蒸发量高达 $1\ 125\sim 1\ 600\text{ mm}$;光照和热量资源丰富,年日照时数为 $2\ 750\sim 3\ 029\text{ h}$,年均光辐射量为 $6\ 000\sim 6\ 220\text{ MJ/m}^2$ 。春季多浮尘和沙尘暴等灾害性天气。土壤母质以棕漠土为主,土壤偏碱性,含盐量高,养分贫瘠。该区经济发展主要依靠第一产业,玉米(*Zea mays* Linn.)、小麦(*Triticum aestivum* L.)和棉花(*Gossypium* spp.)等是该区域主要的经济作物。

1.2 试验设计

玉米的供试品种为:wg8149。试验施用的氮肥是白色晶体的尿素(CON_2H_4 ,含N量为46.4%),P肥选用呈灰色粉末的重过磷酸钙 $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2]$,含 P_2O_5 量为44%,K肥选用颗粒硫酸钾(含 K_2O 量为40%)。

试验于2015年5月—10月在阿拉尔垦区第一师十一团二连内进行,采用随机区组设计,每个处理设5次重复。小区长为5 m,宽为7 m,面积为 35 m^2 。单作玉米行距为60 cm,株距30 cm,每小区种植10行,每行种植18穴,每穴定植1株。玉米打窝时将全部的钾肥和磷肥,30%的氮肥用作基肥,播

种前一次性施入,覆土移栽玉米苗;再于玉米拔节期追施30%的氮肥,于大喇叭期追施40%的氮肥。基肥养分添加时均匀撒开,尽量保持肥料在小区内均匀分布;追肥每次按农户施肥同比例随水施入。施肥处理采用相同的田间管理措施,分别在不同生育期随机取样测定。

1.3 样品采样与测定

1.3.1 野外采样 在立地条件相对一致的情况下,于2015年5月(拔节期)、6月(吐丝期)、7月(乳熟期)、8月(成熟期)在玉米样地随机选取3个1 m×1 m小样方,采用对角线法采集样方内长势均匀、高度大体一致的整株玉米5株,收割法采集样区内玉米的地上器官(包括地上茎和叶片),挖掘法采集玉米的地下器官(包括根茎和须根)。将玉米的根、茎、叶分别切成2~4 cm的小块,放进有标记的信封中,带回实验室测定各器官的元素含量。

1.3.2 试验测定 将农田中采集的玉米根茎叶样品带回实验室清洗后放于105℃烘箱内杀青0.5 h,再将所有样品放置于85℃条件下烘干至恒重。各器官样品用植物粉碎机磨碎后过0.178 mm筛,称重装袋封存用于测定玉米的全碳、全氮和全磷含量。芦苇各器官全碳含量采用重铬酸钾容量法—外加热法测定,全氮含量采用凯氏定氮法测定,全磷含量采用钼锑抗比色法测定。C,N,P测定结果以单位质量的养分含量表示(mg/g),每个样品重复测量3次。

表1 玉米整体的C,N,P含量及其化学计量比的统计学分析

参数	均值/ (mg·g ⁻¹)	标准差	极差/ (mg·g ⁻¹)	极小值/ (mg·g ⁻¹)	极大值/ (mg·g ⁻¹)	偏度	峰度	变异 系数
C	311.97	102.19	338.00	122.08	460.08	-0.53	-1.26	0.33
N	16.41	10.15	34.41	3.00	37.41	0.47	-1.16	0.62
P	2.54	1.19	4.58	0.95	5.53	0.66	-0.30	0.47
C:N	46.94	53.72	202.48	9.45	211.93	1.97	3.00	1.14
C:P	114.17	60.09	305.68	16.63	322.31	0.47	1.09	0.53
N:P	6.66	3.08	12.61	1.39	13.99	0.25	-0.40	0.46

2.2 玉米各器官C,N,P含量及其化学计量比在不同生育期的变化特征

不同生育期玉米各器官的C,N,P含量存在差异性(图1)。各生育期玉米C含量的变化均呈现出叶>茎>根的变化趋势,叶和茎的C含量显著高于根($p<0.05$)。不同生育期各器官的C含量呈现出不同的变化趋势,其中拔节期叶的C含量显著高于乳熟期和成熟期($p<0.05$),茎的C含量在不同生育期间无显著差异,而根的C含量是拔节期显著低于其他3个生育期($p<0.05$)。各生育期中叶的N元

1.4 数据处理

用SPSS 17.0软件和Microsoft Excel 2007对所得试验数据进行处理、绘图和统计分析。计算结果用平均值和标准差(SD)表示。利用单因素方差分析(one-way ANOVA)分析不同生育期玉米根茎叶C,N,P的化学计量特征差异,采用Duncan多重比较不同器官和不同生育期对玉米C,N,P含量及其化学计量比的差异,差异显著性水平为0.05;不同生育期和器官对芦苇C,N,P含量及其化学计量特征的影响结果采用GLM(General Linear Model)模型分析主因子效应和交互作用。

2 结果与分析

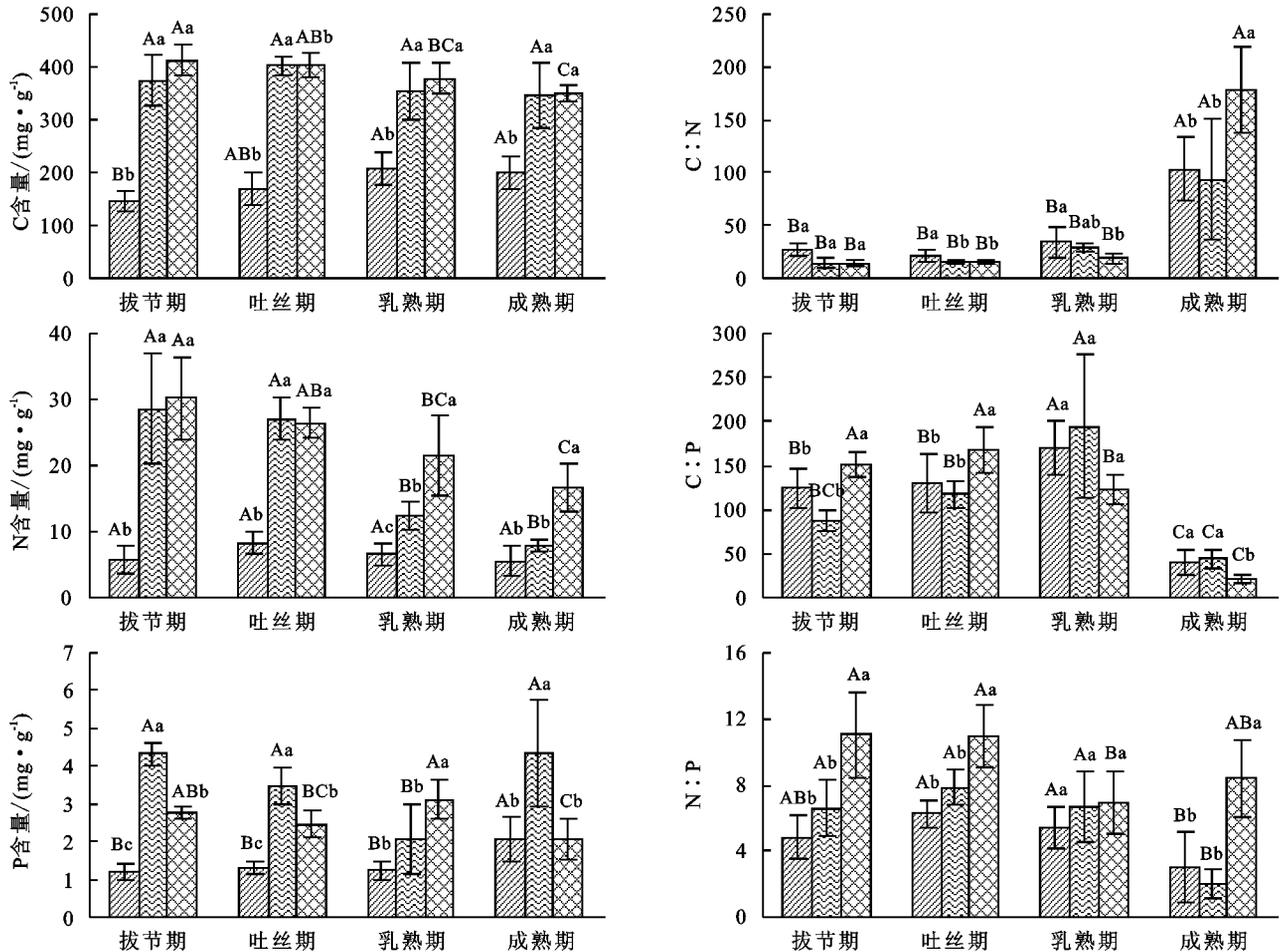
2.1 玉米C,N,P含量及其化学计量比的统计学特征分析

对研究区玉米整体的C,N,P含量及其化学计量比进行经典统计学分析,结果见表1。玉米C,N,P含量的变化范围分别为460.08~122.08,37.41~3.00,5.53~0.95 mg/g,平均值分别为306.40,16.11,2.51(mg/g)。极差分别为338.00,34.41,4.58(mg/g),由于采样中涉及了不同生育期和不同器官,所以出现这样较大的极差。通过进一步分析玉米C,N,P化学计量比,可知C:N,C:P,N:P的变化范围分别为211.93~9.45,322.31~16.63,13.99~1.39,均值分别为46.94,114.17,6.66。

素含量都显著高于根($p<0.05$);不同生育期中拔节期叶和茎的N元素含量显著高于乳熟期和成熟期($p<0.05$),根的N含量不同生育期均无显著差异。各生育期中茎的P含量在拔节期、吐丝期和成熟期均显著高于叶和根($p<0.05$),而乳熟期是叶的P含量显著高于茎和根($p<0.05$);不同生育期中乳熟期叶的P含量显著高于其他3个生育期($p<0.05$),茎的P含量为乳熟期显著低于其他3个生育期($p<0.05$),成熟期根的P含量显著高于其他3个生育期($p<0.05$)。

不同生育期玉米各器官 C : N, C : P 和 N : P 的化学计量比值也呈现出一定的规律变化(图 1)。各生育期在玉米根的 C : N 在吐丝期和乳熟期显著高于叶和茎 ($p < 0.05$), 叶的 C : N 在成熟期显著高于茎和根 ($p < 0.05$); 不同生育期中成熟期玉米的 C : N 显著高于其他生育期 ($p < 0.05$)。各生育期中, 拔节期和吐丝期叶的 C : P 都显著高于叶和根 ($p < 0.05$), 成熟期根和茎的 C : P 均与叶存在显著差异, 乳熟期各器官间

C : P 不存在显著差异 ($p > 0.05$); 不同生育期中乳熟期根和茎的 C : P 均显著高于其他生育期 ($p < 0.05$), 拔节期和吐丝期叶的 C : P 显著高于乳熟期和成熟期 ($p < 0.05$)。各样区玉米 N : P 差异性变化都表现为叶显著高于茎和根 ($p < 0.05$); 不生育期各器官的 N : P 呈现出, 乳熟期叶片的 N : P 显著低于其他生育期 ($p < 0.05$), 成熟期根和茎的 N : P 显著低于其他生育期 ($p < 0.05$)。



注:大写字母 A, B, C 代表不同生育期各器官的显著差异 ($p < 0.05$); 小写字母 a, b, c 代表各样区不同器官的显著特征 ($p < 0.05$)。

图 1 玉米各器官 C, N, P 含量及其化学计量比在不同生育期的变化特征

2.3 玉米各器官 C, N, P 含量及其化学计量比在各个生育期的分配特征

在植物不断适应外界环境和满足自身生长所需时, 其体内的结构性物质、功能性物质和贮藏性物质在分配比例上随着生育期的变化会产生较大的差异。不同生育期玉米 C, N, P 含量分配特征会发生一定的改变(图 2)。在拔节期玉米 C 含量在根茎叶的分配比例分别为 15.63%, 40.13% 和 44.24%; 吐丝期成熟期玉米 C 含量在各器官的分配均未产生较大的变动, 与拔节期相比, 根和茎的 C 含量分配比例增加到 17.25% 和 41.30%, 叶的下降至 40.22%; 到成熟期

C 含量在根的分配比例增加到 22.35%, 茎和叶的 C 含量降低到 38.52% 和 39.13%。从拔节期到成熟期, 玉米 N 含量在根和叶中的分配比例随生育期的变化持续增长, 在成熟期达到 18.54% 和 55.23%; 而 N 含量在茎中的分配比例则不断减小, 到成熟期仅为 26.23%。P 含量在玉米拔节期根、茎和叶的分配比例分别为 14.48%, 52.20% 和 33.32%; 到吐丝期, 根和叶 P 含量分配比例增加了 3.76% 和 0.55%, 而茎的 P 含量分配比例下降到 47.99%; 到成熟期, 根和茎 P 含量的分配比例增加到 24.34% 和 51.27%, 叶的 P 含量下降到 24.39%。

不同生育期玉米 C,N,P 化学计量比的比例也发生了一定的改变(图 2)。

拔节期玉米 C : N 在根、茎和叶的比例分别为 44.28%, 28.11% 和 27.61%, 到成熟期根和茎的 C : N 降低到 27.45% 和 24.98%, 叶的 C : N 则增加到 47.57%; 在拔节期玉米根、茎和叶 C : P 的比例分别为 30.35%, 25.54% 和 44.11%, 与拔节期相比, 到成

熟期玉米根和茎 C : P 的比例分别减小了 2.90% 和 0.56%, 叶 C : P 的变化比例增加到 47.57%; 在拔节期玉米根、茎和叶 N : P 的比例分别为 21.48%, 29.48% 和 49.25%; 到成熟期玉米根和叶 N : P 的比例均有所增加, 其中增加幅度较大的是叶片, 其 N : P 达到 62.43%, 而茎的 N : P 下降了 14.30%, 变化比例降低至 14.96%。

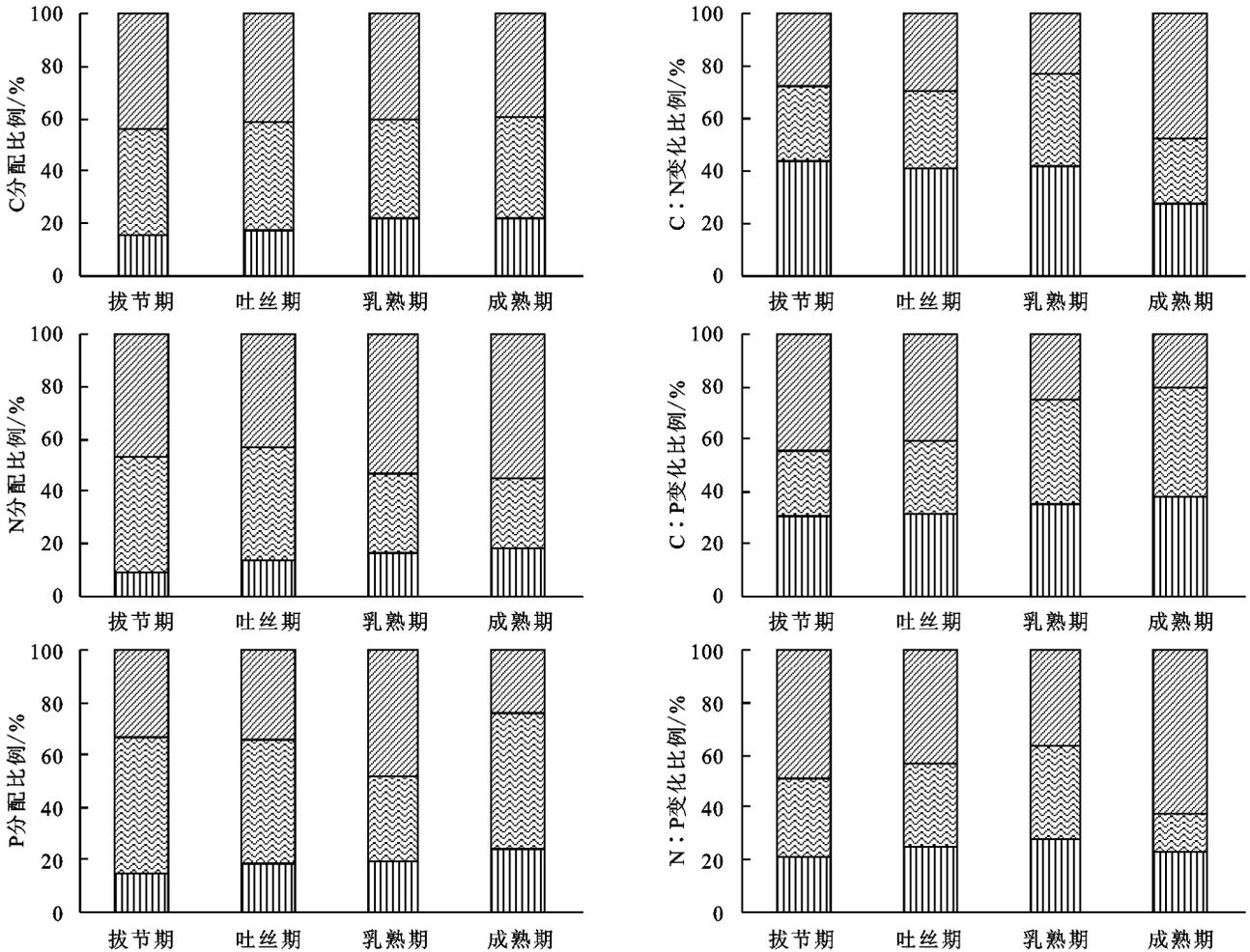


图 2 玉米各器官 C,N,P 含量及其化学计量比分配和变化特征

2.4 生育期和器官对玉米 C,N,P 含量及其化学计量比影响

玉米 C,N,P 含量及其化学计量比受生育期和器官单因素以及两因素交互影响的程度各不相同(表 2)。器官对玉米 C 含量的影响最大, 达到极显著水平 ($p < 0.01$), 其离差平方和为 521 678.57, 生育期的对其的影响不显著, 生育期和器官两因素交互作用对 C 含量的影响也达到显著水平 ($p < 0.05$)。生育期、器官以及生育期和器官两因素交互作用对玉米 N 含量的影响均达到极显著水平 ($p < 0.01$), 其中玉米 N 含量来自器官的影响最大, 其离差平方和为 3 131.71。P 含量的变化受不同生育期的影响最大, 离差平方和达到 648.19, 其次是

不同器官, 最后是两因素的交互作用, 三者对玉米 P 含量的影响均达到极显著水平 ($p < 0.01$)。

玉米 C : N 的变化主要受到不同生育期的影响, 其离差平方和为 122 821.05, 两因素交互作用对玉米 C : N 的影响也达到了极显著水平 ($p < 0.01$)。不同生育期和两因素的交互作用对玉米 C : P 的影响均达到了极显著水平 ($p < 0.01$), 但不同生育期的离差平方和最大达到 137 299.16, 故 C : P 主要受不同生育期的影响。玉米 N : P 的变异主要受不同器官的影响, 其次是不同生育期的影响, 二者对 N : P 的影响均达到极显著水平 ($p < 0.01$), 最后是两因素交互作用的影响, 其影响达到显著性水平 ($p < 0.05$)。

表 2 玉米 C、N、P 含量及其化学计量比整体变异分析

参数	变异来源	df	离差		F
			平方和 SS	均方 MS	
C	生育期	3.00	5135.36	1711.79	1.74
	生育期误差	36.00	35427.10	984.09	
	器官	2.00	521678.57	260839.29	124.83**
	生育期×器官	6.00	28760.97	4793.50	4.87*
	器官间误差	12.00	25073.94	2089.50	
N	生育期	3.00	1399.30	466.43	37.57**
	生育期误差	36.00	446.97	12.42	
	器官	2.00	3131.71	1565.85	56.92**
	生育期×器官	6.00	775.12	129.19	10.40**
	器官间误差	12.00	330.14	27.51	
P	生育期	3(1.132)	648.19	216.06	127.38**
	生育期误差	36(13.586)	61.07	1.70	
	器官	2.00	152.53	76.27	38.82**
	生育期×器官	6(2.264)	230.48	38.41	22.65**
	器官间误差	12.00	23.57	1.96	
C:N	生育期	3(1.118)	122821.05	40940.35	80.25**
	生育期误差	36(13.422)	18366.37	510.18	
	器官	2.00	3512.69	1756.35	3.38
	生育期×器官	6(2.237)	19330.38	3221.73	6.31**
	器官间误差	12.00	6234.70	519.56	
C:P	生育期	3(1.485)	137299.16	45766.39	56.21**
	生育期误差	36(17.817)	29311.54	814.21	0.14
	器官	2.00	351.57	175.78	
	生育期×器官	6(2.969)	31071.99	5178.66	6.36**
	器官间误差	12.00	14982.58	1248.55	
N:P	生育期	3.00	126.07	42.02	19.09**
	生育期误差	36.00	79.23	2.20	
	器官	2.00	222.43	111.22	19.06**
	生育期×器官	6.00	61.76	10.29	4.68*
	器官间误差	12.00	70.04	5.84	

注:*表示 $p < 0.05$, **表示 $p < 0.01$; 自由度后括号内数字为 Greenhouse-Geisser 校正后的自由度结果。

3 讨论与结论

3.1 玉米 C、N、P 含量特征分析

C、N、P 是植物体内的基本营养元素,其生态化学计量特征影响着植物的生长发育和生理机制的调节^[9-11]。本文中玉米体内 C、N、P 元素含量在适应绿洲环境的过程中不断发生改变,从而形成了其独特的生理特性和元素的分配特征。玉米 C、N 元素的平均含量分别为 (311.97 ± 102.19) mg/g, (16.41 ± 10.15) mg/g, 低于全球植物 C $[(464.00 \pm 32.1)$ mg/g] 和 N $[(20.60 \pm 12.20)$ mg/g] 的平均水平^[12-13]; 但研究区玉米 P 平均含量 $[(2.54 \pm 1.19)$ mg/g] 相比全球平均水平 $[(1.99 \pm 1.49)$ mg/g] 较高^[13]。玉米根的 C:N:P 的质量比为 124:4:1, 茎的 C:N:P 的质量比为 132:6:1, 叶的

C:N:P 的质量比为 128:8:1, 均低于全球水平。这表明玉米对研究区的环境具有一定的适应特征, 对养分资源的分配特征也有所不同, 这是植物在生长过程中对营养物质的转移格局^[14-16]。

3.2 玉米各器官 C、N、P 含量及其化学计量比的变化特征

植物各器官由于养分贮存与功能差异性导致其元素含量及化学计量比变化显著^[17]。根是转运和吸收营养元素的主要器官, 其作用是运输养分和水分, 玉米根系发育时吸收的各种元素不仅需要维持气生根等的生长, 还要辅助其他器官的生长^[18], 所以根中的 N、P 元素最少。但根中不发生光合作用, 组织代谢整体较低, 因此根对 C 含量的积累也最少。茎是植物支撑地上和连接地上以及运输植物矿质元素的重要器官, 也是光合产物分配和消耗的器官^[19]。随着玉米植株的生长, 茎也需要大量的有机物来满足自身的生长, 在这样的过程中, 其 C 元素的积累量也会增多。此外氮磷元素的富集与茎的代谢能力以及生命活力有关^[20-21], 茎在满足自身代谢过程中活动旺盛, 对养分的吸收能力也逐渐增强, 提升了 P 浓度, 因此玉米茎中的 P 元素的积累最多。叶片是植物吸收和贮存营养元素的主要地上器官, 也是对环境变化最为敏感的器官^[22-23]。本研究中随着玉米的迅速生长, 叶片中维管组织逐渐增多, 其光合作用不断增强, 糖类在叶片中得到有效积累, 这使得叶相比茎和根存储了更多的 C。此外, 相关研究表明, NRA(硝酸还原酶)是玉米氮代谢的关键酶^[22], 与氮磷的吸收利用有密切的关系, 玉米不同器官中, 叶片的 NRA 活性最大, 因此 N 含量在叶片中的积累也高于茎和根。

植物能根据生长需要自主调整对养分比例, 从而适应外界环境的变化, 而这种适应过程将会导致植物 C:N、C:P 和 N:P 化学计量比的变化^[19, 24]。植物 C:N 和 C:P 在一定程度上反映了植物吸收和同化 C 的能力, 表征了植物对营养元素的利用效率^[24]。较高的 C:N 和 C:P 代表了植物对 N 和 P 的利用效率较高, 植物在养分缺乏的环境中具有较高的养分利用策略。在整个生长过程中, 玉米叶片为了增强对外界环境的适应能力, 增加了对 C 的分配, 提高了对 N 和 P 的利用效率, 因此叶片 C:N 和 C:P 增加。叶片是植物新陈代谢最旺盛的器官, 植物 N:P 反映了其所在环境的 N 和 P 养分条件。本研究中玉米叶片的 N:P 要相对高于茎和根, 这是其对 N 和 P 较高的利用效率有关。

3.3 不同生育期玉米 C、N、P 含量及其化学计量比特征

植物在不同生长阶段时, 会根据植物对环境的适

应将有限的养分资源按照一定比例分配给不同器官,因此植物形成了一定的生长特征和元素的分配规律^[25-26]。玉米植株是一个由不同器官构成的有机整体,各生育阶段各器官元素积累分配和转运,是保证其生长发育的基础^[10-11]。本研究中,玉米不同生育期 C, N, P 含量及其化学计量比差异显著。拔节期玉米以营养生长为主,此时玉米光合作用增强,积累了大量的可溶性糖^[27]。玉米生长代谢旺盛,为满足植株的生长,需要大量的蛋白质和核酸,因此拔节期 C 和 N 含量最高;吐丝期是玉米营养生殖和生殖生长并进的时期^[28],此时玉米体内合成和积累的营养物质也较多,而积累的营养物质不仅要继续满足叶和茎的生长需要,还要为保证生殖器官的正常发育提供支持,所以此时期玉米的 C 和 N 含量也相对较高;乳熟期玉米茎和叶中所贮存的营养物质开始大量向正在发育的玉米籽粒输送^[28-29],所以乳熟期玉米 N 和 P 含量较低。到成熟期玉米生长基本停滞,光合作用速率降低,吸收的营养元素主要转移到生殖器官,用于种子的发育,故此时 C 含量最低, P 含量最高。

生长速率理论认为,生物体在生长发育的过程中,能够通过改变他们自身的 C : N : P 比值来适应自身生长速率的变化^[9]。本研究中玉米在不同生育阶段, C : N 随着生长呈增加的趋势,到成熟期达到最高,造成这种趋势的原因是由于随着玉米的衰老氮代谢从同化向再分配转化^[30],其体内 N 的分解速度和释放量相对大于 C,所以使得比值下降。而 C : P 随着生长呈降低的趋势,这是因为玉米从拔节期到成熟期,为营养生长到生殖生长的过程,需要合成具有遗传作用的蛋白质^[30-31],对 P 的利用效率和积累量相对较大。N : P 是判断植物生长过程中环境对其养分供应状况的指标^[12],本研究中各生育期中玉米生长速率所对应叶片 N : P 的最大值为 11, 小于 14, 所以可认为玉米生长更易受 N 元素限制。

3.4 生育期和器官对玉米 C, N, P 含量及其化学计量比影响

玉米在生长过程中其 C, N, P 化学计量特征受到不同因素的影响。本文中玉米 P, C : N 和 C : P 的变异主要受不同生育期的影响, C, N 和 N : P 的变异主要受不同器官的影响, N 含量的变异性对 N : P 的动态变化起主导作用。生育期对玉米生态化学计量特征的影响与玉米自身不同物候期的生理特性有关^[32-33], 且生育期水肥环境的不同也会造成这种差异^[34-36]。尽管玉米 P, C : N 和 C : P 受生育期的影响, 但玉米 P 变化特征也受到自身结构特征的影响。

植物对元素吸收和利用状况依据器官结构功能的

不同而变化^[34]。获得 C 最主要的途径是玉米器官的光合作用, 所以器官对 C 含量的影响相对较大。N 对植物的生长发育起着十分重要的作用, 研究区玉米生长主要是来源于施肥, 当环境中可供玉米生长的氮素不足, 玉米根据自身生长需要, 通过调节器官中的蛋白质及其代谢物组来逐步适应 N 利用策略的变化^[34-36]。这是植物重要的生长调节和物质分配的策略, 也是植物与环境相适应的结果。研究表明, 植物在自然生长过程中, 通过调节不同器官的养分变化及其化学计量比值来适应环境变化。所以器官对 C, N 和 N : P 的影响最大。但生育期对 N 和 N : P 影响也均达到了显著水平, 这说明玉米器官对养分的吸收利用具有异质性。

综合本文研究结果发现, 本研究对象玉米的生长在拔节期到成熟期都更易受到 N 元素的限制。因此, 初步断定在玉米拔节期和成熟期, 需适量增加氮肥的施用, 有利于维持土壤氮肥的平衡。玉米在拔节期需较高 N 元素来增强光合作用, 以此来增加可溶性糖的积累, 促进蛋白质合成, 为植株的快速生长和各器官的发育提供养分; 在乳熟期和成熟期需要较多 P 元素来促进生殖器官的发育, 加快玉米籽粒的成熟^[32]。但本研究结论与此不同, 这可能是与农民在玉米各生育期所施的氮肥和磷肥的比重有关, 因此对于玉米生育期元素变化影响的研究还需结合施肥试验进一步开展。

参考文献:

- [1] 沈永平, 王国亚, 张建岗, 等. 人类活动对阿克苏河绿洲气候及水文环境的影响[J]. 干旱区地理, 2008, 31(4): 524-534.
- [2] 张恒嘉, 黄高宝. 绿洲调亏灌溉春小麦农田生态化学计量特征[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 59-62.
- [3] 谢高地, 肖玉. 农田生态系统服务及其价值的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(6): 645-651.
- [4] Sardans J, Rivas-Ubach A, Penuelas J. The C : N : P stoichiometry of organisms and ecosystems in a changing world: a review and perspectives[J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2012, 14(1): 33-47.
- [5] Bradshaw C, Kautsky U, Kumlblad L. Ecological stoichiometry and multi-element transfer in a coastal ecosystem[J]. Ecosystems, 2012, 15(4): 591-603.
- [6] 赵航, 贾彦龙, 王秋风. 中国地带性森林和农田生态系统 C—N—P 化学计量统计特征[J]. 第四纪研究, 2014, 34(4): 803-814.
- [7] 把余玲, 田霄鸿, 万丹, 等. 玉米植株不同部位还田土壤活性碳、氮的动态变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1166-1173.
- [8] 于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 等. 不同生育期玉米叶片光合特

- 性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2902-2909.
- [9] 赵亚芳, 徐福利, 王渭玲, 等. 华北落叶松根茎叶碳氮磷含量及其化学计量学特征的季节变化[J]. 植物学报, 2014, 49(5): 560-568.
- [10] 陈传永, 王荣焕, 赵久然, 等. 不同生育时期遮光对玉米籽粒灌浆特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(9): 1650-1657.
- [11] 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.
- [12] Elser J J, Bracken M E, Cleland E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems [J]. Ecology Letters, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [13] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. Pnas, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [14] 邵凤武, 赵居生, 王春敏, 等. 青贮玉米不同生育期营养成分、生物产量和适宜收获期研究[J]. 天津农业科学, 2007, 13(4): 26-29.
- [15] 李单凤, 于顺利, 王国勋, 等. 黄土高原优势灌丛营养器官化学计量特征的环境分异和机制[J]. 植物生态学报, 2015, 39(5): 453-465.
- [16] 李征, 韩琳, 刘玉虹, 等. 滨海盐地碱蓬不同生长阶段叶片 C, N, P 化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2012, 36(10): 1054-1061.
- [17] 阿布里孜·阿不都热合曼, 吕光辉, 张雪妮, 等. 新疆艾比湖流域植物光合器官碳、氮、磷生态化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2015, 34(8): 2123-2130.
- [18] 徐云姬, 钱希昉, 李银银, 等. 根系分区交替灌溉对玉米籽粒灌浆及相关生理特性的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(2): 230-242.
- [19] 罗艳, 贡璐. 塔里木盆地南缘不同生境下芦苇生态化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2016, 35(3): 684-691.
- [20] 周新国, 韩会玲, 李彩霞, 等. 玉米灌浆期渍水对产量及氮磷淋失量的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 99-103.
- [21] 葛敏, 吕远大, 张体付, 等. 玉米氮素敏感性差异自交系的表达谱分析[J]. 作物学报, 2016, 42(10): 1487-1494.
- [22] 张仁和, 郑友军, 马国胜, 等. 干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(5): 1303-1311.
- [23] Bi Y M, Meyer A, Downs G S, et al. High throughput RNA sequencing of a hybrid maize and its parents shows different mechanisms responsive to nitrogen limitation[J]. BMC Genomics, 2014(15): 1471-2164.
- [24] 戚德辉, 温仲明, 王红霞, 等. 黄土丘陵区不同功能群植物碳氮磷生态化学计量特征及其对微地形的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6420-6430.
- [25] 胡耀升, 么旭阳, 刘艳红. 长白山森林不同演替阶段植物与土壤氮磷的化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 632-638.
- [26] Sardans J, Rivas-Ubach A, Peñuelas J. The elemental stoichiometry of aquatic and terrestrial ecosystems and its relationships with organismic lifestyle and ecosystem structure and function: A review and perspectives [J]. Biogeochemistry, 2012, 111(1/3): 1-39.
- [27] 刘祖贵, 刘战东, 肖俊夫, 等. 苗期与拔节期淹涝抑制夏玉米生长发育、降低产量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 44-52.
- [28] 解振兴, 董志强, 薛金涛. 供氮量及化学调控对玉米苗期生长及氮素吸收分配特征的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(2): 128-133, 137.
- [29] Ren B, Zhang J, Dong S, et al. Effects of duration of waterlogging at different growth stages on grain growth of summer maize (*Zea mays* L.) under field conditions [J]. Journal Agronomy and Crop Science, 2016, 202(6): 564-575.
- [30] Aye T M, Hedley M J, Loganathan P, et al. Effect of organic and inorganic phosphate fertilizers and their combination on maize yield and phosphorus availability in a Yellow Earth in Myanmar [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 83(2): 111-123.
- [31] Yang X S, Wu J, Ziegler T E, et al. Gene expression biomarkers provide sensitive indicators of in planta nitrogen status in maize [J]. Plant Physiol, 2011, 157: 1841-1852.
- [32] Schlüter U, Mascher M, Colmsee C, et al. Maize source leaf adaptation to nitrogen deficiency affects not only nitrogen and carbon metabolism but also control of phosphate homeostasis [J]. Plant Physiol, 2012, 160: 1384-1406.
- [33] 郭丙玉, 高慧, 唐诚, 等. 水肥互作对滴灌玉米氮素吸收、水氮利用效率及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3679-3686.
- [34] 刘广全, 赵士洞, 王浩, 等. 锐齿栎林非同化器官营养元素含量的分布[J]. 生态学报, 2001, 21(3): 422-429.
- [35] Chardin C, Girin T, Roudier F, et al. The plant RWP-RK transcription factors: key regulators of nitrogen responses and of gametophyte development [J]. Journal of Experimental Botany, 2014, 65: 5577-5587.
- [36] Ghahfarokhi M G, Mansurifar S, Taghizadeh-Mehrjardi R, et al. Effects of drought stress and rewatering on antioxidant systems and relative water content in different growth stages of maize (*Zea mays* L.) hybrids [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2015, 61(4): 493-506.