

塔里木河上游典型绿洲中棉花的生态化学计量特征 及其与棉田连作年限的关系

陈新^{1,2} 贡璐^{1,2*} 李红林^{1,2} 罗艳^{1,2} 安申群^{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 为讨论生态化学计量特征与连作年限的关系,选取塔里木河上游阿拉尔垦区 5、10、15、20 和 30 年连作的棉田作为研究样地,分析棉花不同器官生态化学计量特征及其与土壤、产量的关系。结果表明:1)C 质量分数、N:P 的平均值±标准差在叶片中最高((422.3±20.6)g/kg;11.4±4.6),N 和 P 质量分数在棉籽中最高((38.1±11.8)g/kg;(14.4±5.0)g/kg),C 与 N、C 与 P 质量比在纤维中最高(193.0±44.2;1 008.4±305.4);棉花各器官 C、N 和 P 随连作年限延长均表现为先增高后降低的趋势,C 与 N、C 与 P、N 与 P 质量比无统一变化规律。2)棉花各器官 C、N 和 P 及计量比的变异性表现为 N:P>P>C:P>C:N>N>C;整体变异来源分析表明不同器官间对棉花 C、N 和 P 质量分数,C 与 N、C 与 P 和 N 与 P 质量比变化的贡献大于连作年限间差异。3)棉花产量随连作年限延长表现为先增加后减少,在 20 年时最高,5 年时最低;棉田土壤 C 和 N 质量分数,C:N、C:P 和棉花 C 均与棉花产量具有显著或极显著正相关关系。分析表明,棉花各器官生态化学计量特征在不同连坐年限中存在差异性,受 N、P 元素共同限制,同时与产量具有一定联系。

关键词 棉花;生态化学计量;营养元素;连作年限;产量

中图分类号 S225

文章编号 1007-4333(2018)09-0089-11

文献标志码 A

Stoichiometric characteristics of cotton in the oasis of upper reaches of Tarim River and its relationship with continuous cropping years

CHEN Xin^{1,2}, GONG Lu^{1,2*}, LI Honglin^{1,2}, LUO Yan^{1,2}, AN Shenqun^{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 To study the stoichiometric characteristics of cotton at different continuous cropping years. the Alar Oasis in the upper reaches of the Tarim River was selected as the target area, and the cotton fields of 5, 8, 15, 20, and 30 years of continuous cropping were selected as the study plots, and the ecological and chemical characteristics of cotton and yield were analyzed. The results showed that: 1) The contents of C and N were the highest in leaves ((422.3 ± 20.6) g/kg, 11.4 ± 4.6), and the contents of N and P were the highest in cottonseed ((38.1 ± 11.8), (14.4 ± 5.0) g/kg). The C, N and P were the highest in the fiber (193.0 ± 44.2, 1 008.4 ± 305.4). The C, N and P of cotton were increased first and then decreased Trend, C : N, C : P, N : P no uniform law of change. 2) The variability of C, N, P and metering ratio of each organ in cotton was N : P > P > C : P > C : N > N > C; the variance of the whole variance showed that C, N, P, C : N, C : P and N : P were greater than those of continuous cropping. 3) Cotton production with the extension of the number of years for the first increase after the reduction, the highest in 20 years, the lowest in 5 years. The C, N, C : N, C : P and cotton C of cotton soil had significant or significant positive correlation with cotton yield.

收稿日期: 2017-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41461105)

第一作者: 陈新, 硕士研究生, E-mail: chenxin_199301@sina.com

通讯作者: 贡璐, 教授, 主要从事干旱区资源与环境方面研究, E-mail: gonglu721@163.com

Keywords cotton; ecological stoichiometric; nutrient elements; continuous cropping years; yield

C、N 和 P 元素是植物生长发育的必要元素,其组分及平衡稳定关系在调节植物生理、生态活动中具有重要地位并参与物质能量流动过程,已成为生态系统物质能量循环与平衡研究的核心内容^[1-3]。生态化学计量学是研究生态过程中 C、N 和 P 等多种化学元素平衡关系的科学方法,为全球生物地球化学循环与生态系统的耦合关系提供了思路^[4-6]。生态化学计量学最初应用于水域生态系统研究,之后主要集中于森林、草地以及湿地生态系统等陆地生态系统研究^[7-10]。研究涉及土壤、植物器官、凋落物及其相互组成间的微系统特征,得出在不同环境、水平尺度上系统发展受到各营养元素综合作用限制^[11-12]。然而关于农田生态系统土壤-植物微系统 C、N 和 P 元素特征研究相对较少,尤其是绿洲农田生态系统的研究更为少见^[13]。农田生态系统作为陆地生态系统元素循环的关键环节,其土壤碳库特征、养分结构和植物元素吸收利用策略、分配模式受人类活动影响强烈,是全球生物地球化学循环及土壤养分科学管理等生态环境问题研究的重要内容^[14-15]。绿洲农田生态系统是决定干旱区生态系统结构与功能的关键组分,联系着生态系统内部及外部的物质循环,研究其元素平衡关系、养分循环特征对区域农业经济发展具有重要意义^[16]。

塔里木河上游绿洲光照条件良好,是我国重要的棉花(*Gossypium* spp.)种植基地。农业发展正处于传统模式转向现代化的关键过渡期,长期的传统耕作模式导致植株生长发育受阻、病虫害加剧、产量大幅下降等严重连作障碍问题,已成为限制农业可持续发展的重要因素^[17-18]。本研究以阿拉尔垦区为靶区,系统分析了不同连作年限对土壤、植物器官 C、N、P 元素的影响,并从化学计量和养分元素角度探讨维系棉花产量形成的影响因素,旨在解析农田营养元素、产量特征对连作的响应,补充绿洲农田生态系统尤其是棉花连作领域的研究,促进农田生态系统的良性发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

阿拉尔垦区地处塔里木盆地北缘、天山中段南麓(80°30′~81°58′E、40°22′~40°57′N),由阿克苏河与叶尔羌河的冲积平原形成,沿河岸及冲沟两侧略有抬升,海拔平均为 1 012 m。属典型的暖温带大陆性

干旱荒漠气候,降水稀少,年均降水量 44.7 mm;蒸发强烈,年均蒸发量 2 498 mm;光热条件良好,昼夜温差大,年平均温度 12.4 °C,无霜期 220 d,年均光辐射量 598.7 kJ。土壤母质主要为棕漠土,原生土壤含盐量高,偏碱性,适宜种植长绒棉、细绒棉,是我国唯一的长绒棉和重要的细绒棉生产基地。

1.2 样品采集

采用空间替代时间序列方法,选择研究区连作 5、10、15、20 和 30 年的棉田作为样地,样地重复数为 3 块,均为荒地开垦而来,本底土壤属性基本一致,历年施肥情况见表 1。当年样地棉花品种为‘新陆早 38 号’,管理措施、栽培模式参照一般大田,其施肥水平为 N 素(37.42(g/m²))、P 素(29.28(g/m²))、K 素(9.80(g/m²)),采用膜下滴灌技术,一膜六行种植,追肥随水施入,行间距为(12+66+12+66+12)cm,理论株数为 22.5 万株/hm²。

表 1 研究区样地历年施肥情况

Table 1 Fertilizations over the years in the study area

历年施肥情况 Fertilization over the	氮肥 N	磷肥 P	钾肥 K
2011		127	94
2012		147	84
2013	338	186	78
2014	345	247	75
2015	374	293	98
平均	352	242	83

采样时间为 2015 年 9 月(吐絮期)。每个样地随机设置 3 个 5 m×5 m 的样方,按对角线法选取样方内长势均一、生长健康的 10 棵棉株,齐地面剪下收取地上部分(茎、叶、棉桃)样品,清除土壤表面杂质并挖掘根系。同步采集样方内 0~20 cm 表层土壤样品,去除土样中的植物根系和杂质后采用四分法取土样 500 g。于棉花成熟后跟踪调查收获产量。

1.3 样品测定

植物样品带回实验室清洗后于烘箱中 105 °C 下杀青 0.5 h,棉桃剥离为棉壳、棉籽和纤维样品。所有植物样品在 65 °C 下烘干至恒重,粉碎过 100 目(0.15 mm)筛后封装待测。土壤样品在实验室内自然风干后于烘箱内 105 °C 烘干至恒重,粉碎过 100 目筛,封装待测。

土壤和植物样品的 C 含量采用重铬酸钾氧化外加热法测定, N 含量采用凯氏定氮法测定, P 含量采用硝酸-高氯酸消煮-钼锑抗分光光度法测定。每个样品重复测定 3 次, 测定结果单位: g/kg。

1.4 数据分析

使用 Excel 2007 进行数据前期处理, SPSS17.0 软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)、多重比较、相关性分析(Pearson)。多重比较时需进行方差齐性检验, 若方差齐性, 使用最小显著性差数法(LSD), 若方差非齐性, 则采用 Tamhane's Ta 法($P < 0.05$ 时为显著性差异; $P < 0.01$ 时为极显著性差异)。

2 结果与分析

2.1 棉花各器官生态化学计量学特征

由表 2 可知棉花各器官 C、N 和 P 含量存在差

异性。C 元素含量表现为叶片最大(422.26 ± 20.55) g/kg, 纤维最小(364.07 ± 40.29) g/kg; N、P 元素含量均表现为棉籽最高(38.07 ± 11.78), (14.41 ± 4.97) g/kg, 纤维最低(1.97 ± 0.44), (0.39 ± 0.12) g/kg; C 与 N、C 与 P 质量比均表现为纤维最高(193.02 ± 44.18 , 1008.40 ± 305.04), 棉籽最低(10.93 ± 2.87 , 29.81 ± 9.54); N 和 P 比表现为叶片最大(11.37 ± 4.58), 棉籽最小(2.78 ± 0.78)。多重比较结果显示($P < 0.05$), C 元素中茎、叶、壳显著高于根、纤维; N 元素中各器官间均具有显著性差异; P 元素中根与茎间无显著差异性; C 与 N 质量比中各器官间均具有显著性差异; C 与 P 质量比中根、茎显著高于叶、壳; N 与 P 质量比中叶与壳间无显著差异性

表 2 棉花不同器官 C、N、P 含量及质量比特征

Table 2 Average content of C, N, P and stoichiometric ratio in different organs of cotton

器官 Organs	含量/(g/kg)			质量比 Mass ratio		
	C	N	P	C : N	C : P	N : P
根	377.31 ± 35.81 c	7.81 ± 2.22 e	1.37 ± 0.41 d	52.54 ± 16.97 b	296.54 ± 81.92 b	6.15 ± 2.49 c
茎	408.32 ± 19.03 ab	11.21 ± 2.07 d	1.48 ± 0.57 d	37.90 ± 8.65 c	321.03 ± 133.44 b	8.67 ± 3.73 b
叶	422.26 ± 20.55 ab	23.89 ± 6.84 b	2.25 ± 0.60 b	18.93 ± 4.86 e	199.08 ± 47.61 c	11.37 ± 4.58 a
壳	403.71 ± 21.59 ab	18.86 ± 2.99 c	1.86 ± 0.54 c	21.92 ± 3.67 d	238.04 ± 78.92 c	11.00 ± 3.52 a
棉籽	387.05 ± 32.21 bc	38.07 ± 11.78 a	14.41 ± 4.97 a	10.93 ± 2.87 f	29.81 ± 9.54 d	2.78 ± 0.78 d
纤维	364.07 ± 40.29 c	1.97 ± 0.44 f	0.39 ± 0.12 e	193.02 ± 44.18 a	1008.40 ± 305.04 a	5.45 ± 2.01 c

注:不同小写字母表示植物不同器官间有显著差异性($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate that there are significant differences among different organs of plants ($P < 0.05$).

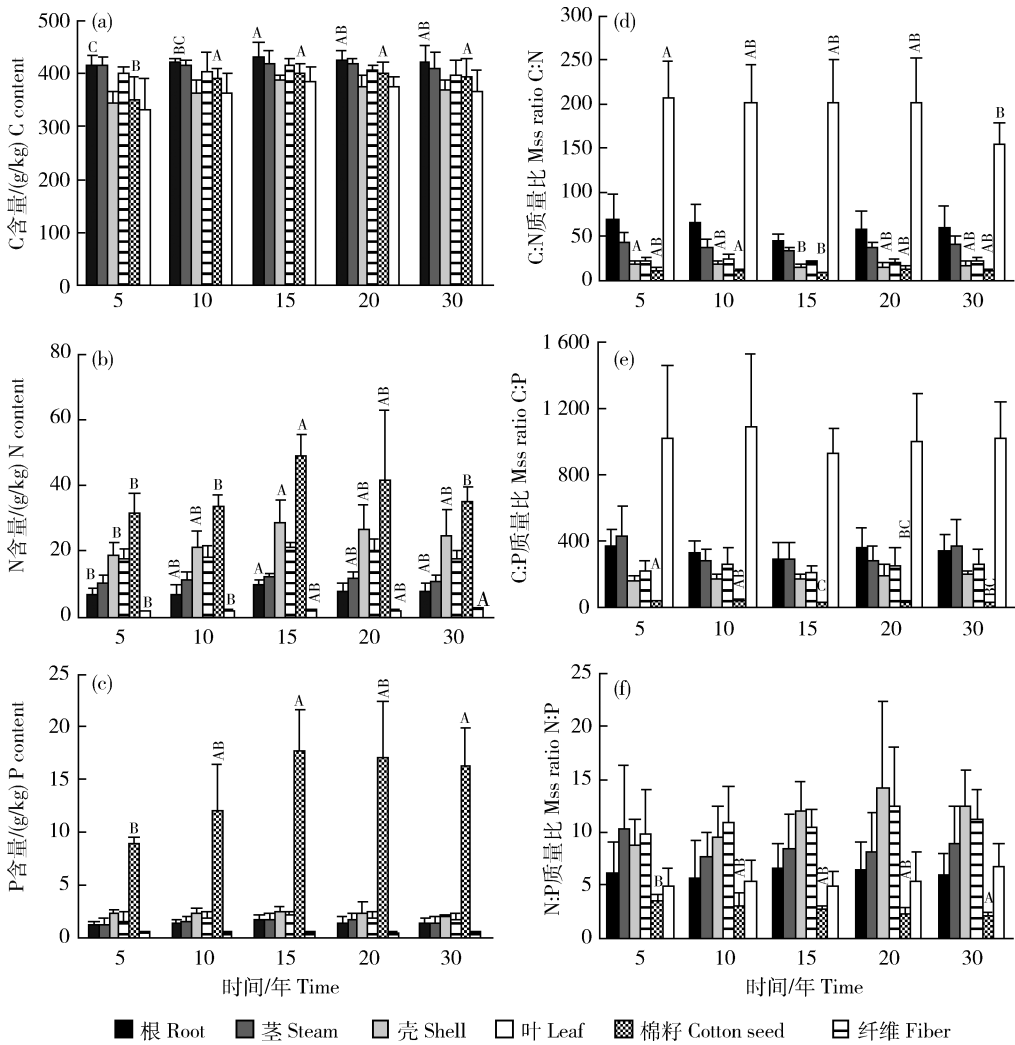
2.2 不同连作年限棉花各器官生态化学计量学特征

整体变化中可知(图 1), 棉花 C、N 和 P 含量均呈现出先增高后降低的趋势, 连作 15 年时普遍较高, 5 年时普遍较低, 各器官 C、N 和 P 含量在连作年限中的差异性不同。棉花根 C 在连作 15 年时显著 > 5 和 10 年; 棉籽 C 在连作 5 年时显著较低。根和叶 N 在连作 15 年时显著 > 5 年; 棉籽 N 在 15 年时显著 > 5 、10 和 30 年; 纤维 N 在 30 年时显著 > 5 和 10 年。棉籽 P 在连作 15 和 30 年时显著 > 5 年。

棉花各器官 C 与 N、C 与 P、N 与 P 质量比整体上无统一变化规律, 在不同连作年限间棉花各器官计量比表现出不同差异性(图 1)。棉花叶 C 与 N 质量比在连作 5 年时显著 > 15 年。棉籽 C 与 N 质量比在连作 10 年时显著 > 15 年。棉籽 N 与 P 质量比在连作 30 年时显著 > 5 年。

2.3 棉花 C、N、P 含量及其质量比的整体变异来源分析

由表 3 可知, 棉花根和叶的 C 呈现出显著正相关关系; 叶和壳的 N 存在显著正相关关系; 茎和棉籽的 P 具有显著正相关关系, 叶和棉籽 P 存在极显著正相关关系; 叶和棉籽的 C 和 N 质量比具有显著正相关关系; 壳和纤维的 N 与质量比存在显著正相关关系。不同器官 C 含量变异系数较小, 均 $< 12\%$, 其中纤维 $>$ 棉籽 $>$ 根 $>$ 壳 $>$ 叶 $>$ 茎。各器官 N 含量变异系数均高于 15% , 排序为棉籽 $>$ 叶 $>$ 根 $>$ 纤维 $>$ 茎 $>$ 壳。P 含量变异系数均 $> 26\%$, 排序为茎 $>$ 棉籽 $>$ 纤维 $>$ 根 $>$ 壳 $>$ 叶。棉花各器官 C 与 N 质量比变异系数均 $> 16\%$, 其中根最大为 33.73% 。C 和 P 质量比变异系数均高于 23% , 其中茎最高为 40.96% 。N 与 P 质量比变异系数均 $> 28\%$, 茎最大为 43.01% 。



大写字母表示同一器官在不同连作年限有显著性差异 ($P < 0.05$)。

Capital letters indicate that the same organ has significant differences in years of continuous operation ($P < 0.05$).

图1 不同器官的C、N、P含量及质量比的年际变化特征

Fig. 1 The variation of C, N, P and C : N, C : P, N : P mass ratio of different organs

表3 棉花不同器官生态化学计量特征的相关关系和变异情况

Table 3 The correlation and variation situation of ecological stoichiometry characteristics in different organs

器官 Organs	C		N		P		质量比 Mass ratio					
							C : N		C : P		N : P	
	CC	CV/%	CC	CV/%	CC	CV/%	CC	CV/%	CC	CV/%	CC	CV/%
根	a*	6.11	a	28.44	a	29.63	a	33.73	a	28.15	a	40.49
茎	b	4.50	b	18.49	b*	38.51	b	21.80	b	40.96	b	43.01
叶	a*	4.87	c*	28.64	d**	26.61	d*	25.67	d	23.92	d	40.32
壳	c	5.35	c*	15.83	c	29.12	c	16.75	c	33.16	c*	31.95
棉籽	d	8.32	d	30.95	b* d**	34.47	d*	26.24	e	32.00	e	28.03
纤维	e	11.07	e	22.43	e	31.14	e	22.89	f	30.25	c*	36.81

注:CC为 Pearson 相关系数,包含相同字母表示不同类型间具有相关关系,* :显著相关 ($P < 0.05$);** :极显著相关 ($P < 0.01$);CV为变异系数。

Note: CC, Pearson correlation coefficient, containing the same letters indicating a correlation between different types,* : significant correlation ($P < 0.05$); ** : extremely significant correlation ($P < 0.01$); CV, coefficient of variation.

棉花器官、连作年限及二者间交互作用对棉花 C、N 和 P 含量及其计量比的影响各不相同(表 4)。棉花 C 含量受器官、连作年限极显著影响($P < 0.01$),受两因素交互作用的影响也达到显著水平($P < 0.05$)。N 含量的变异主要受器官极显著影响($P < 0.01$),其次是年限。P 含量受器官、年限以及两因素交互作用极显著影响($P < 0.01$),其中器官

影响最为显著,其次为年限。棉花 C 与 N、C 与 P、N 与 P 的质量比均仅受器官极显著影响($P < 0.01$),C 与 P 质量比受器官影响的离差平方和最大。通过对比器官、连作年限以及两因素共同作用因素的 F 值发现,棉花器官对 C、N 和 P 及其质量比变化的贡献大于连作年限间差异,由此可知器官间差异性在元素变化中占据主导地位。

表 4 棉花不同器官 C、N 和 P 含量及其质量比的整体变异来源分析

Table 4 The effect of variation from different organs, years and both interactions on C, N, P and C : N, C : P, N : P mass ratios in cotton

成分 Composition	变异来源 Source of variation	df	离差平方和 SS	均方 MS	F
C	器官	5	58 008.98	11 601.80	17.16**
	年限	4	17 724.39	4 431.10	6.54**
	器官×年限	20	25 567.35	1 278.37	1.89*
	误差	120	81 344.16	677.87	
N	器官	5	20 971.36	4 194.27	143.98**
	年限	4	681.62	170.40	5.85**
	器官×年限	20	717.94	35.90	1.23
	误差	120	3 495.88	29.13	
P	器官	5	3 532.48	706.50	253.20**
	年限	4	54.98	13.74	4.93**
	器官×年限	20	230.14	11.51	4.12**
	误差	119	332.04	2.79	
C : N	器官	5	592 043.14	118 408.63	311.10**
	年限	4	2 157.11	539.28	1.42
	器官×年限	20	8 816.28	440.81	1.16
	误差	120	45 673.76	380.62	
C : P	器官	5	14 364 719.17	2 872 943.83	120.34**
	年限	4	47 930.49	11 982.62	0.50
	器官×年限	20	131 267.74	6 563.39	0.28
	误差	119	2 840 974.00	23 873.73	
N : P	器官	5	1 397.61	279.52	27.22**
	年限	4	25.38	6.35	0.62
	器官×年限	20	135.18	6.76	0.66
	误差	119	1 221.85	10.27	

注：* :显著相关($P < 0.05$)；** :极显著相关($P < 0.01$)。

Note: * , significant correlation ($P < 0.05$) ; ** , extremely significant correlation ($P < 0.01$).

2.4 不同连作年限棉田生态化学计量特征与产量的关系

由表 5 可知,不同连作年限中棉花产量特征具有一定差异性。随连作年限延长棉花产量表现

出先增长后降低的趋势,连作 20 年时最高(5 703(kg/hm²)),5 年时最低(4 815(kg/hm²))。棉花产量变异系数排序为 5 > 10 > 30 > 20 > 15 年,其中最大为 13.95%,最小为 3.07%。

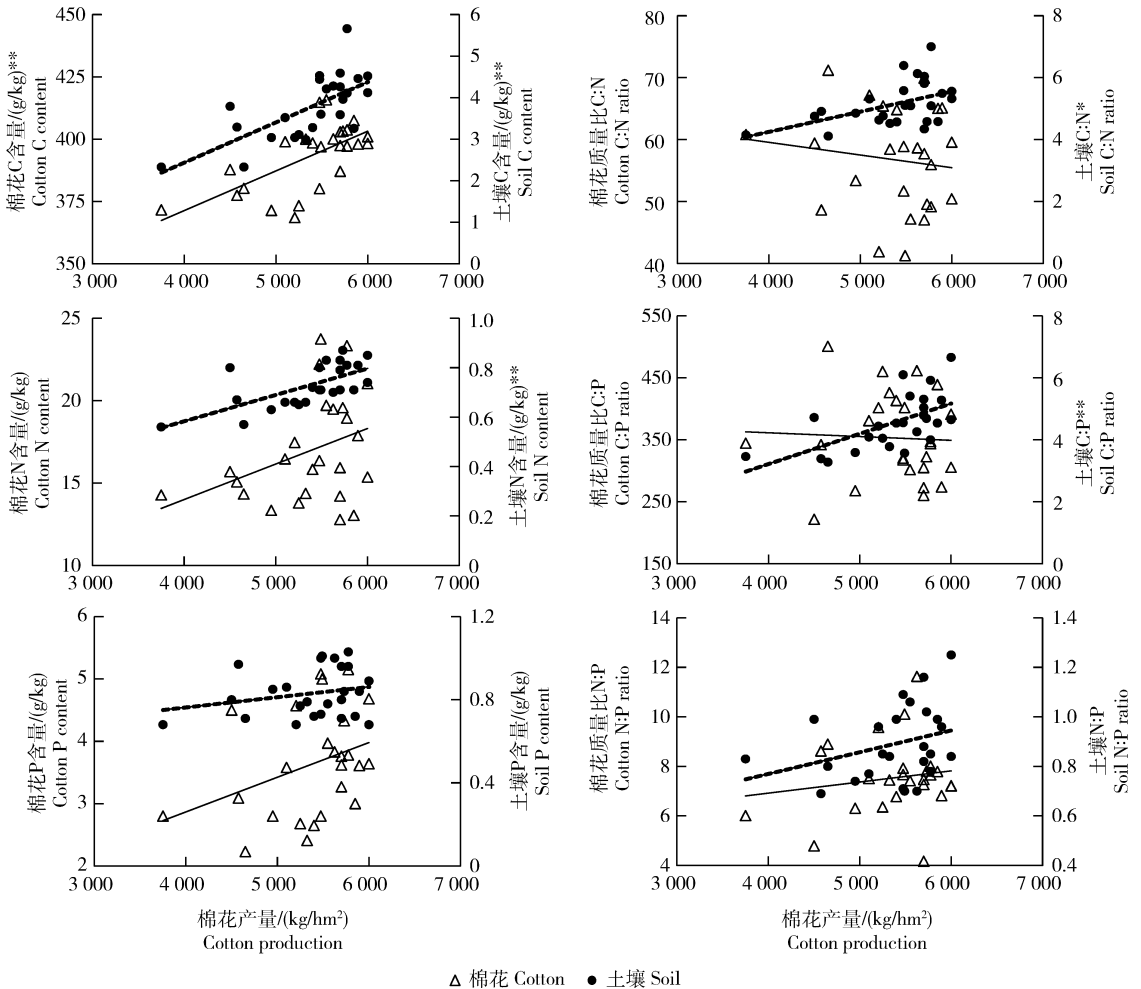
表5 不同连作年限棉花产量统计学特征

Table 5 Statistical characteristics of cotton yield in different continuous cropping years

连作年限/年 Cropping years	均值/ (kg/hm ²) Mean	标准差/ (kg/hm ²) SD	最大值/ (kg/hm ²) Max	最小值/ (kg/hm ²) Min	变异系数/% CV
5	4 815	671.66	5 475	3 750	13.95
10	4 980	419.60	5 400	4 500	8.43
15	5 694	174.80	5 895	5 475	3.07
20	5 703	186.87	6 000	5 490	3.28
30	5 697	299.32	6 000	5 205	5.25
平均	5 378	541.68	6 000	3 750	10.07

土壤是植物生长发育的载体,其营养元素优适配比有利于植物生长发育,影响化学组成并促使作物产量、品质形成趋于良性状态^[19-20]。通过棉田土壤、棉花整体C、N和P元素及其计量比与产量的相关性分析可知(图2):土壤和棉花的C含量均与棉

花产量呈现为极显著正相关关系($P < 0.01$);土壤N含量与棉花产量表现出极显著正相关关系($P < 0.01$);土壤C与N质量比与产量具有显著正相关关系($P < 0.05$);土壤C与P质量比与产量存在极显著正相关关系($P < 0.01$)。



* : 与棉花产量显著相关 ($P < 0.05$); ** : 与棉花产量极显著相关 ($P < 0.01$).
 * : significant correlated ith cotton yield ($P < 0.05$); ** : extremely significant correlation with cotton yield ($P < 0.01$).

图2 棉花和土壤C、N、P及质量比与产量的相关关系

Fig. 2 Cotton, soil C, N, P and stoichiometry characteristics of measurement and yield

3 结论与讨论

3.1 棉花各器官 C、N 和 P 及其计量比特征分析

植物 C、N 和 P 元素参与细胞结构、功能形成,与植物许多生理生化过程密切相关^[1]。棉花各器官间 C、N 和 P 含量及计量比特征受器官结构、所执行的生态学功能、对环境的适应性以及敏感性影响而具有差异性^[21]。棉花根、茎、叶是维持植物生长发育的重要营养器官,其中 C、N 和 P 元素含量可作为反映棉株营养分配、循环的重要指标。本研究发现棉花根 C、N 和 P 含量均低于其余器官,与罗艳等^[22]基于植物各器官生态化学计量学特征研究的结果类似,可能因为根部是重要的吸收和转运器官,吸收营养后仅留少量根部所需,而将大量营养输送于其他器官^[23]。茎 C 含量较高,仅低于叶片,因为茎作为支撑、输送器官,由较多的木质素、纤维素等富含 C 素的多糖物质组成^[24];而茎 N 和 P 含量较低,仅高于根部,这是因为与根部有相似的功能作用。

植物叶片是植物进行光合作用的重要场所,对植物生产力有着显著影响,关于 C、N 和 P 元素的研究甚多,Reich 等^[25]、Han 等^[26]以及任书杰等^[27]均对不同生态系统、不同植物种叶片 N、P 元素含量进行了大量研究和归纳。本研究中棉花叶片的 C 含量低于全球 492 种陆地植物叶片 C 含量(464 g/kg)^[28],主要因为不同植物对环境的适应对策不同,棉花抗逆性相对较强,生长缓慢,光合积累量较慢^[29];N、P 含量高于我国 753 种陆生植物叶片 N、P 含量(18.6 g/kg);1.21 g/kg)^[25],因为寿命短、快速生长的植物叶片 N 含量高于寿命长的缓慢生长植物^[27],加之植物对资源的利用方式、养分的利用效率均存在差异^[30-31],使得 N、P 元素含量在不同植物中表现不同。叶片的 N 与 P 质量比常作为判断植物是否受到 N、P 限制的临界值,Koerselman 和 Meuleman 认为 $N:P < 14$ 时更易受 N 限制, $N:P > 16$ 时更易受 P 限制,当 $14 < N:P < 16$ 时受两因素的共同限制^[32];贡璐等^[33]通过 N、P 添加试验综合发现棉花受 N、P 元素共同限制,其限制性养分元素的临界值为 13。但实际研究中环境、植物种间呈现出差异性,加之土壤中养分元素含量与植物养分含量存在显著的相关性^[34],因此在判断是否受 N、P 限制时往往还需要综合考虑^[35]。本研究中叶片 N 与 P 质量比为 (11.37 ± 4.58) ,结合 N、P 含量特征,

认为棉花生长更倾向于受两因素的共同限制^[33]。

棉桃是重要的生殖器官,由棉壳、棉纤维、棉籽组成。棉籽 N、P 含量显著高于其他器官,因为棉籽中拥有大量的蛋白质和遗传物质以促进营养储备和果实成熟,N、P 分别是构成蛋白质、核酸的主要元素^[36],因此含量较高;棉籽的 C 与 N、C 与 P、N 与 P 质量比在各器官中最低,主要是由 N、P 含量所决定。棉纤维 C、N、P 含量在各器官中均表现为最低,因为棉纤维的主要成分就是纤维素,而纤维素又主要由碳、氢、氧 3 种元素组成,故其中的 N、P 元素含量非常稀少。

3.2 棉花各器官 C、N 和 P 含量及其计量比的相关性和整体变异分析

棉花各器官间的 C、N 和 P 含量及计量比具有一定的相关性,表明植物对养分吸收利用是相互联系的,因为 C、N 和 P 元素参与植物各种生理代谢过程,在生长发育过程中对养分的汲取和吸收在一定程度上具有同步性^[12,37],彼此独立而又相互影响^[38]。棉花 C 素的变异系数较小,因为 C 素是构成植物干物质的主要元素,且 C 素还是植物各生理代谢过程的底物与能量来源^[39],各器官 C 含量相对稳定;N、P 元素和化学计量比变异性均较高,主要因为器官元素含量分配与其所执行的功能密切相关,对元素的选择吸收因器官不同而发生较大变化^[37-38]。

变异来源分析中棉花 C、N 和 P 受器官、年限极显著影响,其中器官引起的差异主要因为所执行的生态学功能不同,对营养元素的吸收利用策略具有特异性,直接造成元素的极显著差异性^[12,37];年限的影响是因为随连作延长土壤状况发生变化,进而促使植物对元素的需求改变。首先是土壤理化性质的改变,长期连作会造成土壤养分元素不均衡,通透性变差,大量元素和微量元素相应减少,进而引起棉花元素差异^[40-41];其次是生物酶活性的变化,随连作年限延长自毒分泌物增加,代谢减弱,土壤生物酶活性变差,植物所吸收利用元素发生变化^[42];继而是微生物群落的变化,连作使土壤中细菌、放线菌数量降低,真菌数量增加,根际微生物群落多样性降低,产生连作障碍,进而作物营养缺失^[43],因此连作年限对 C、N 和 P 也具有极显著影响。C 与 N、C 与 P、N 与 P 的变异来源主要是器官,因为各器官的结构、功能不同,元素的吸收利用策略各有偏重,故具有极显著影响。棉花生态化学计量的变异来源主要

为器官,其次是年限,可能因为各器官随植物生长同步发育形成,元素积累直接由植物体内生理生化过程产生,时间上具有一定的同步性,作用明显^[12,33];年限的作用主要是先通过改变土壤状况,促使生长环境的改变,间接影响植物元素特征^[17,40],因此器官的贡献高于年限。

3.3 不同连作棉田 C、N 和 P 及计量比与产量的关系

棉花是新疆绿洲的重要经济作物,其产量关系着区域经济发展。不同连作年限的棉花产量不同,且与土壤、棉花整体 C、N 和 P 元素及其计量比间具有一定联系。贡璐等^[44]对塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量的研究中发现棉花产量随连作年限延长呈现出先升高后略微降低的趋势。这与本研究结果一致,可能是因为随连作加强,土壤微生物、团聚体结构发生变化致使土壤质地改变,进而影响棉花品质形成^[17,44]。棉花产量总体变异程度较小,可能是因为所研究样地内棉花未遭受病虫害和自然灾害,加之供水、施肥等均有稳定保障,主要受棉田连作年限延长所产生的生理生化性质影响,故产量较为稳定。

本研究发现不同连作年限中产量变化与棉田土壤、棉花 C 元素的变化具有一致性,且棉花、土壤 C 元素均与产量表现为极显著正相关。因为 C 是重要的生命元素,植物的生理代谢、生长发育、品质形成均与 C 含量密切相关,其生物量中包含大量 C 元素,并参与土壤-植物系统元素循环,表现出一定的同步性^[45-47]。棉花产量与土壤 N、C 与 N 及 C 与 P 质量比存在显著或极显著相关性,说明在适宜环境下,土壤 N、P 元素有利于产量形成^[33];因为土壤 N、P 是植物吸收利用、形成蛋白质和遗传物质并供给生长的主要元素,良好的 N、P 条件促使植物趋于良性发展,更易出现较高产量^[48-50]。此外本研究对不同连作年限棉田生态化学计量特征进行了详细研究,而关于棉花具体生理生化过程的深入研究较少。需进一步研究棉花生长发育、生物酶、养分吸收等的作用机制,以丰富作物营养分配格局、作物-土壤-产量的相关研究。

参考文献 References

[1] Sardans J, Rivas-Ubach A, Pe uelas 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

[2] Ågren G I, Wetterstedt J Å M, Billberger M F K. Nutrient limitation on terrestrial plant growth-modeling the interaction between nitrogen and phosphorus [J]. *New Phytologist*, 2012, 194: 953-960

[3] 郭宝华, 刘广路, 范少辉, 杜满义, 苏文会. 不同生产力水平毛竹林碳氮磷的分布格局和计量特征[J]. *林业科学*, 2014, 50(6): 1-9

Guo B H, Liu G L, Fan S H, Du M Y, Su W H. Distribution patterns and stoichiometry characteristics of C, N, P in *Phyllostachys edulis* forests of different productivity levels[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(6): 1-9 (in Chinese)

[4] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, Fagan W F, Markow T A, Cotner J B, Harrison J F, Hobbie S E, Odell G M, Weider L W. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540-550

[5] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 2-6

He J S, Han X G. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 2-6 (in Chinese)

[6] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947

Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3937-3947 (in Chinese)

[7] Sardans J, Pe uelas J. Climate and taxonomy underlie different elemental concentrations and stoichiometries of forest species: The optimum "biogeochemical niche" [J]. *Plant Ecology*, 2014, 2015(4): 441-455

[8] Song Z L, Liu H Y, Zhao F J, Xu C Y. Ecological stoichiometry of N:P:Si in Chinese grasslands[J]. *Plant and Soil*, 2014, 380(1): 165-179

[9] Qu F Z, Yu J B, Du S Y, Li Y Z, Lü X F, Ning K, Wu H F, Meng L. Influences of anthropogenic cultivation on C, N and P stoichiometry of reed-dominated coastal wetlands in the Yellow River Delta[J]. *Geoderma*, 2014, 235(4): 227-232

[10] Huang W J, Zhou G Y, Liu J X, Zhang D Q, Xu Z H, Liu S Z. Effects of elevated carbon dioxide and nitrogen addition on foliar stoichiometry of nitrogen and phosphorus of five tree species in subtropical model forest ecosystems [J]. *Environmental Pollution*, 2012, 168(5): 113-120

[11] 杨新芳, 鲍雪莲, 胡国庆, 邵帅, 周锋, 叶佳舒, 解宏图, 梁超. 大兴安岭不同火烧年限森林凋落物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1359-1367

Yang X F, Bao X L, Hu G Q, Shao S, Zhou F, Ye J S, Xie H T, Liang C. C, N, P stoichiometry characteristics of litter and soil of forests in Great Xing'an Mountains with different fire years[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1359-1367 (in Chinese)

- [12] 陈婵, 王光军, 赵月, 周国新, 李栋, 高吉权. 会同杉木器官间 C、N、P 化学计量比的季节动态与异速生长关系[J]. 生态学报, 2016, 36(23): 7614-7623
Chen C, Wang G H, Zhao Y, Zhou G X, Li L, Gao J Q. Seasonal dynamics and allometric growth relationships of C, N, and P stoichiometry in the organs of *Cunninghamia lanceolata* from Huitong[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(23): 7614-7623 (in Chinese)
- [13] Gong L, He G, Liu W. Long-term cropping effects on agricultural sustainability in Alar oasis of Xinjiang, China [J]. *Sustainability*, 2016, 8(1): 61
- [14] 刘昱, 陈敏鹏, 陈吉宁. 农田生态系统碳循环模型研究进展和展望[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 1-9
Liu Y, Chen M P, Chen J N. Progress and perspectives in studies on agro-ecosystem carbon cycle model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(3): 1-9 (in Chinese)
- [15] 祝贞科, 沈冰洁, 葛亿达, 王久荣, 袁红朝, 吴金水. 农田作物同化碳输入与周转的生物地球化学过程[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 5987-5997
Zhu Z K, Shen B J, Ge T D, Wang J R, Yuan H C, Wu J S. Biogeochemical processes underlying the input and turnover of crop assimilative carbon in farmland ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(19): 5987-5997 (in Chinese)
- [16] Wang Y L, Zhao C Y, Ma Q L, Li Y K, Jing H J, Sun T, Milne E, Easter M, Paustian K, Yong H W A, McDonagh J. Carbon benefits of wolfberry plantation on secondary saline land in Jingtai oasis, Gansu: A case study on application of the CBP model[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 157: 303-310
- [17] 陈一峰, 高亚楠, 朱杰, 张伟. 新疆棉花长期连作对土壤真菌群落结构组成的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(01): 80-86
Chen Y F, Gao Y N, Zhu J, Zhang W. Analysis of the fungal community in continuous cropping cotton field of Xinjiang using 18S rDNA-PCR-DGGE[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(1): 80-86 (in Chinese)
- [18] 陈玲, 董坤, 杨智仙, 董艳, 汤利, 郑毅. 连作障碍中化感自毒效应及间作缓解机理[J]. 中国农学通报, 2017, 33(8): 91-98
Chen L, Dong K, Yang Z X, Dong Y, Tang L, Zheng Y. Allelopathy autotoxicity effect of successive cropping obstacle and its alleviate mechanism by intercropping [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(8): 91-98 (in Chinese)
- [19] 王雪梅, 贺玉晓, 刘刚才. 土壤与植被间物质组成的协容特征: 以稻田与水稻为例[J]. 中国农学通报, 2015, 31(11): 234-242
Wang X M, He Y X, Liu G C. Coordinated characteristics of material composition between soil and vegetation: Taking paddy soil and rice as examples[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(11): 234-242 (in Chinese)
- [20] Zhao H Y, Guo B L, Wei Y N, Zhang B. Multi-element composition of wheat grain and provenance soil and their potentialities as fingerprints of geographical origin [J]. *Journal of Cereal Science*, 2013, 57(3): 391-397
- [21] 平川, 王传宽, 全先奎. 环境变化对兴安落叶松氮磷化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 1965-1974
Ping C, Wang C K, Quan X K. Influence of environmental changes on stoichiometric traits of nitrogen and phosphorus for *Larix gmelinii* trees[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(8): 1965-1974 (in Chinese)
- [22] 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
Luo Y, Gong L. Stoichiometric characteristics in root, stem and leaf of phragmites australis in different habitats in the southern marginal zone of Tarim basin[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(3): 684-691 (in Chinese)
- [23] 蒙好生, 冯娇银, 胡冬冬, 秦武明, 严理. 植物根系发育与养分的吸收[J]. 山西农业科学, 2017, 45(6): 1048-1052
Meng H S, Feng J Y, Hu D D, Qin W M, Yan L. Root system development and nutrient absorption in plant [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2017, 45(6): 1048-1052 (in Chinese)
- [24] Minden V, Kleyer M. Internal and external regulation of plant organ stoichiometry[J]. *Plant Biology*, 2014, 16(5): 897
- [25] 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(30): 11001-11006
- [26] Han W X, Fang J Y, Guo D, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385
- [27] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 王绍强. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究[J]. 环境科学, 2007, 28(12): 2665-2673
Ren S J, Yu G R, Tao B, Wang S Q. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(12): 2665-2673 (in Chinese)
- [28] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, Dobberfuhl D R, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham S S, McCauley E, Schulz K L. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. *Nature*, 2000, 408(6812): 578-580
- [29] 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
Wang K B, Shanguan Z P. Seasonal variations in leaf C, N, and P stoichiometry of typical plants in the Yangou watershed in the loess hilly gully region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(17): 4985-4991 (in Chinese)

- 2011, 31(17): 4985-4991 (in Chinese)
- [30] 李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸. 黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究[J]. 环境科学, 2015(3): 1084-1091
Li X, Zeng Q C, An S S, Dong Y H, Li Y Y. Ecological stoichiometric characteristics in leaf and litter under different vegetation types of Zhifanggou watershed on the Loess Plateau, China[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(3): 1084-1091 (in Chinese)
- [31] 张珂, 何明珠, 李新荣, 谭会娟, 高艳红, 李刚, 韩国君, 吴杨杨. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6538-6547
Zhang K, He M Z, Li X R, Tan H J, Gao Y H, Li G, Han G J, Wu Y Y. Foliar carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of typical desert plants across the Alashan desert[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(22): 6538-6547 (in Chinese)
- [32] Koerselman W. The vegetation N:P ratio; A new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441-1450
- [33] 贡璐, 李红林, 刘雨桐, 安申群. N、P施肥对塔里木河上游绿洲棉花C、N、P生态化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7689-7697
Gong L, Li H L, Liu Y T, An S Q. Effects of nitrogen and phosphorus fertilizers on carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry of oasis cotton in the upper reaches of Tarim River, Xinjiang, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22): 7689-7697 (in Chinese)
- [34] 严正兵, 金南瑛, 韩廷申, 方精云, 韩文轩. 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(06): 551-557
Yan Z B, Kim nam-young, Han T S, Fang J Y, Han W X. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Arabidopsis thaliana* [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(6): 551-557 (in Chinese)
- [35] Güsewell S, Koerselman W. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants[J]. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics*, 2002, 5(1): 37-61
- [36] Niklas KJ, Cobb E D. N, P, and C stoichiometry of *Eraanthis hyemalis* (Ranunculaceae) and the allometry of plant growth [J]. *American Journal of Botany*, 2005, 92(8): 1256-1263
- [37] 李红林, 贡璐, 洪毅. 克里雅绿洲旱生芦苇根茎叶C、N、P化学计量特征的季节变化[J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6547-6555
Li H L, Gong L, Hong Y. Seasonal variations in C, N, and P stoichiometry of roots, stems, and leaves of *Phragmites australis* in the Keriya oasis, Xinjiang, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(20): 6547-6555 (in Chinese)
- [38] Cherif M, Elser J. Ecological Stoichiometry[M]. Springer Netherlands, 2017
- [39] 胡惠敏, 王冬梅. 草-环境系统植物碳氮磷生态化学计量学及其对环境因子的响应研究进展[J]. 草业学报, 2011, 20(02): 244-252
Yang H M, Wang D M. Advances in the study on ecological stoichiometry in grass-environment system and its response to environmental factors[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 5(2): 247-264 (in Chinese)
- [40] 徐文修, 罗明, 李大平, 赵双印. 不同连作年限棉田土壤理化性质及微生物区系变化规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(03): 134-138
Xu W X, Luo M, Li D P, Zhao S Y. Changes in soil physicochemical properties and microflorae under long-term cotton continuous cropping[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(3): 134-138 (in Chinese)
- [41] 韩春丽, 刘娟, 张旺锋, 刘梅, 黄皖疆, 高旭梅, 张宏芝. 新疆绿洲农田土壤-棉花系统9种矿质元素生物循环特征[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6234-6241
Han C L, Liu J, Zhang W F, Liu M, Huang W J, Gao X M, Zhang H Z. Biocycling of nine mineral elements of soil-cotton system in Xinjiang oasis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(22): 6234-6241 (in Chinese)
- [42] 李银平, 林忠东, 李小斌, 徐文修, 王亭, 杨涛, 侯松山, 韩晶垒, 侯猛. 北疆连作棉田轮作倒茬模式的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(01): 243-246, 254
Li Y P, Lin Z D, Li X B, Xu W X, Wang T, Yang T, Hou S S, Han J L, Hou M. Study on crop rotation patterns for field with continuous cropping of cotton in Northern Xinjiang [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(1): 243-246, 254 (in Chinese)
- [43] Liu J G, Li Y B, Jiang G Y, Geng W. Allelopathic effects of cot-ton in continuous cropping [J]. *Allelopathy Journal*, 2008, 21(2): 299-306
- [44] 贡璐, 张海峰, 吕光辉, 杜东伟. 塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价[J]. 生态学报, 2011, 31(14): 4136-4143
Gong L, Zhang H F, Lv G H, Du D W. Soil quality assessment of continuous cropping cotton fields for different years in a typical oasis in the upper reaches of the Tarim River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 17(11): 947-55 (in Chinese)
- [45] 宋永昌. 植被生态学[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2001
Song Y C. *Vegetation Ecology* [M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2001 (in Chinese)
- [46] 吴立素. 桉树退耕还林模式生物量、碳储量及营养元素研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016
Wu L S. Research on biomass, carbon reserve and nutrient elements in eucalyptus plantations under returning farmland to forest [D]. Nanning: Guangxi University, 2016 (in Chinese)
- [47] 郑宇飞. 种植模式和施氮量对棉花养分吸收利用及产量品质

- 的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2014
- Zheng Y F. Effects of wheat-cotton cropping system and nitrogen rates on nutrition uptake and utilization, yield and fiber quality of cotton [D]. Nanjing: Najing Agricultural University, 2014 (in Chinese)
- [48] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 张浩, 杜虎. 桂西北喀斯特区原生林与次生林鲜叶和凋落叶化学计量特征[J]. 生态学报, 2016, 36(07): 1907-1914
- Zeng Z X, Wang K L, Liu X L, Zeng F P, Song T Q, Peng W X, Zhang H, Du H. Stoichiometric characteristics of live fresh leaves and leaf litter from typical plant communities in a karst region of northwestern Guangxi, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(7): 1907-1914(in Chinese)
- [49] 南学军, 蔡立群, 武均, 刘小宁, 高志强, Stephen Yeboah, 张仁陟. 生物质炭与氮肥配施对春小麦产量及其 C : N : P 的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(08): 1154-1162
- Nan X J, Cai L Q, Wu J, Liu X N, Gao Z Q, Stephen Y, Zhang R Z. Effect of combined application of biochar and N-fertilizer on yield and C : N : P ratio of spring wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(08): 1154-1162 (in Chinese)
- [50] Chen Z Q, Chen Z B, Yan X Y, Bai L Y. Stoichiometric mechanisms of *Dicranopteris dichotoma*, growth and resistance to nutrient limitation in the Zhuxi watershed in the red soil hilly region of China[J]. *Plant and Soil*, 2016, 398: 367-379

责任编辑:王燕华