

外方山草本植物叶片生长期 C、N、P 生态化学计量学特征的变化

田耀武,贺春玲,赵燕,徐少君

(河南科技大学 林学院,河南 洛阳 471003)

摘要:为揭示同一生活型草本植物生长期內 C、N、P 生态化学计量学特征,在豫西南外方山设置羊胡子草(*Carex rigescens*)、芒草(*Miscanthus sinensis*)、野菊花(*Dendranthema indicum*)样地,测定生长期內叶片 C、N、P 含量及其生态化学计量比。结果表明:同一生活型种间植物叶片化学计量学特征具有多变性,胡子草、芒草、野菊花等 3 种植物生长期內叶片 C 含量平均为 447.6 g/kg、448.1 g/kg 和 459.9 g/kg,N 含量为 26.8 g/kg、23.5 g/kg 和 25.6 g/kg,P 含量为 1.9 g/kg、1.5 g/kg 和 2.0 g/kg;3 种植物综合变异系数排序为 P 含量(45.0%)>C/P 值(33.2%)>N/P 值(30.1%)>C/N 值(26.0%)>N 含量(25.3%)>C 含量(2.0%),C 含量最稳定,N 含量次之,P 含量较不稳定;C 含量与 N、P 含量负相关性均不显著($P > 0.05$),P 含量与 N 含量正相关性极显著($r = 0.736, P < 0.01$),N 含量与 C/N 值负相关性极显著($r = -0.700, P < 0.01$),P 含量与 C/P 值负相关性极显著($r = -0.891, P < 0.01$),C/N 值与 C/P 值正相关性显著($r = 0.283, P < 0.05$);植物种类对叶片 C 含量影响显著($P < 0.05$),N 含量、P 含量、C/N 值与 C/P 值主要受生长期采样时间的影响($P < 0.05$),物种种类与采样时间对 N/P 值影响不显著($P > 0.05$)。研究区域植物叶片生态化学计量特征时,应考虑植物种类与生长期的影响。

关键词:外方山;生活型;生长期;草本植物;生态化学计量学

中图分类号:Q948 文献标志码:A 文章编号:1004-3268(2017)05-0120-06

Variations of Herbaceous Plant Leaf C, N, P Ecological Stoichiometrical Characteristics during Growth Period in Waifang Mountain

TIAN Yaowu, HE Chunling, ZHAO Yan, XU Shaojun

(College of Forestry, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: In order to explore variations of leaf ecological stoichiometrical characteristics during the growth period of herbaceous plants with the same life form, three kinds of experimental plots with *Carex rigescens*, *Miscanthus sinensis* and *Dendranthema indicum* were chosen in Waifang mountain area in Southwest of Henan province, China. We monitored carbon, nitrogen and phosphorus contents, C/N, C/P and N/P mass ratios in three plant species mentioned above at different growth dates from May to October, 2014. The results showed that plant leaf carbon, nitrogen and phosphorus contents and C/N/P stoichiometrical characteristics had variability among plant species. The average content in leaves of three species were 447.6 g/kg, 448.1 g/kg and 459.9 g/kg for carbon, 26.8 g/kg, 23.5 g/kg and 25.6 g/kg for nitrogen, and 1.9 g/kg, 1.5 g/kg and 2.0 g/kg for phosphorus during the growth period, respectively. Considering the comprehensive analysis based on total variation (resulting from two factors: sampling date and species), the rank of coefficient of variation (CV) for each parameter was phosphorus content(45.0%)>C/P ratio(33.2%)>N/P ratio(30.1%)>C/N ratio(26.0%)>nitrogen content(25.3%)>carbon

收稿日期:2016-11-15

基金项目:国家自然科学基金项目(U1404322,31670616)

作者简介:田耀武(1975-),男,河南许昌人,副教授,博士,主要从事森林生态学方面的研究。E-mail:tianyaowu@126.com

content (2.0%), carbon content had a minimum variation width, followed by nitrogen element, phosphorus element was less stable. The negative correlation between carbon content and nitrogen content was not significant ($P > 0.05$), and the correlation between carbon content and phosphorus content was the same. But phosphorus content and nitrogen content were significantly positively correlated ($r = 0.736, P < 0.01$). Nitrogen content and C/N ratio were significantly negatively correlated ($r = -0.700, P < 0.01$), phosphorus content and C/P ratio were significantly negatively correlated ($r = -0.891, P < 0.01$), C/N ratio and C/P ratio were significantly positively correlated ($r = 0.283, P < 0.05$). The effect of plant species on leaf carbon content was significant ($P < 0.05$), the nitrogen content, phosphorus content, C/N ratio and C/P ratio were mainly affected by sampling date ($P < 0.05$), the N/P ratio was not affected by sampling time and plant species ($P > 0.05$). When plant leaf ecological stoichiometrical characteristics was studied in some regional ecosystems, the effects of plant species and growth period should be considered.

Key words: Waifang mountain; life form; growth period; herbaceous species; ecological stoichiometry

C、N、P元素在植物生长和生理机制调节方面的耦合作用最强,是植物体最基本的结构性和功能性物质^[1-3]。生物生长过程的实质是C、N、P元素的积累与相对比例的调节过程^[4],生态化学计量学(ecological stoichiometry)主要研究生态过程中生物体主要化学元素的量值及其比例关系^[5]。外部环境变化时,生物有保持主要元素稳定的能力^[6],但同一生态系统中,种内种间植物体的C、N、P元素化学计量学特征具有多变性,而消费者体内元素相对稳定^[7]。一些文献也报道了不同物候期内,植物特别是叶片C、N、P的计量特征会出现较大的波动^[8-10],陆地植物C、N、P含量及其化学计量学特征越来越成为研究热点之一^[11-12]。同一生活型植物,结构与功能相似,对外界环境的适应与进化趋同^[13],而目前有关同一地区同一生活型草本植物叶片C、N、P化学计量特征在一个生长期内的变化研究并不多见。鉴于此,以豫西南外方山地区植物生长期内同一生活型草本植物羊胡子草(*Carex rigescens*)、芒草(*Miscanthus sinensis*)、野菊花(*Dendranthemum indicum*)叶片为研究对象,分析其C、N、P化学计量学特征的变化,分析同一生活型草本植物生态化学计量特征变化的影响因素,为区域植物叶片取样设计提供理论基础。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

外方山为秦岭东部余脉,地处熊耳山东南,伊河以东,北汝河以南,东至豫东平原,西南与伏牛山相连,东西宽50~90 km,东北—西南长约100 km,为黄河、淮河和长江水系分水岭,暖温带与北亚热带过渡地带。采样区位于外方山北坡,洛阳市嵩县车村镇东南部塔园沟,东经112°08'10",北纬33°45'45",海拔1 250 m,年平均气温12.5℃,年均降雨量

861 mm,70%的降水集中在6—9月份,多暴雨,成土母质为花岗岩,山地黄棕壤,土壤垂直带发育完整。植被覆盖度大,林木优势树种为栓皮栎、麻栎、白桦等,草本植物以羊胡子草、芒草、野菊花等为主。

1.2 样地设计与采样分析

2014年,在采样区内选择生境一致的羊胡子草、芒草和野菊花样地各3个,采样时间为2014年5—10月的每月30日。在样地中各设2.0 m×2.0 m的采样方,剪取羊胡子草、芒草和野菊花叶片,装入信封,带回实验室清洗干净,杀青、烘干、粉碎、混合、过筛(0.5 mm)。植物C、N含量采用Vario EL元素分析仪(德国)测定,P含量采用钼锑抗比色法测定^[14]。

1.3 数据分析

采用SPSS 18.0统计分析软件相关程序包进行方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 C、N、P含量变化与变异特征

2014年生长期内,羊胡子草、芒草、野菊花叶片C、N、P含量均发生了变化(表1),C含量分别为425.3~465.2 g/kg、431.8~462.7 g/kg和439.5~490.0 g/kg,N含量为17.8~41.0 g/kg、13.5~32.1 g/kg和16.5~41.7 g/kg,P含量为1.0~4.1 g/kg、0.9~2.2 g/kg和1.1~4.9 g/kg;3种植物C、N和P平均含量分别为447.6 g/kg、448.1 g/kg和459.9 g/kg、26.8 g/kg、23.5 g/kg和25.6 g/kg,1.9 g/kg、1.5 g/kg和2.0 g/kg,含量值均在植物生长范围之内。方差分析表明,羊胡子草、芒草、野菊花C含量在2014年生长期内差异不显著,而N、P含量差异显著($P < 0.05$)。生长期内,羊胡子草、芒草、野菊花C含量变化没有规律性,而N、P呈现一定的规律性:5月份含量较高,6、7月份含量较低,8、

9月份含量回升,10月份含量又一次下降。

羊胡子草生长期 C、N、P 含量变异系数排序为 P(51.5%)>N(25.1%)>C(2.6%),芒草为 P(23.7%)>N(20.4%)>C(1.2%),野菊花为

P(59.7%)>N(30.4%)>C(2.1%)。3 种植物平均变异系数为 P(45.0%)>N(25.3%)>C(2.0%)。从变异系数上看,3 种植物均表现为 C 含量最稳定,N 含量次之,P 含量较不稳定。

表 1 外方山草本植物叶片生长期 C、N、P 含量变化

采样时间/ (年 - 月 - 日)	羊胡子草			芒草			野菊花			g/kg
	C	N	P	C	N	P	C	N	P	
2014-05-30	446.7±27.0a	37.3±5.6a	3.7±0.6a	440.7±46.7a	24.6±3.4b	2.0±0.7a	459.0±56.4a	38.0±2.5a	4.5±0.6a	
2014-06-30	459.9±34.6a	24.7±4.6c	1.2±0.8c	449.8±56.1a	24.3±2.5b	1.3±0.4cd	475.9±41.2a	21.6±2.6d	1.9±0.6b	
2014-07-30	450.1±38.4a	19.6±6.8d	1.2±0.3c	442.6±34.6a	22.2±1.6b	1.0±0.0d	461.0±34.7a	18.2±2.7de	1.5±0.1c	
2014-08-30	450.4±49.3a	26.9±8.2c	2.0±0.6b	453.7±45.7a	29.3±4.3a	1.5±0.2c	463.6±34.1a	31.1±3.1b	1.6±0.2c	
2014-09-30	425.9±41.1a	31.3±7.1b	2.2±0.7b	452.7±65.1a	25.5±4.7b	1.6±0.2bc	453.2±43.7a	25.7±2.7c	1.2±0.1d	
2014-10-30	452.9±34.6a	20.6±9.7cd	1.2±0.7c	449.0±49.0a	14.9±6.1c	1.7±0.2b	449.8±54.6a	18.8±3.6de	1.5±0.1c	
最小值	425.3	17.8	1.0	431.8	13.5	0.9	439.5	16.5	1.1	
最大值	465.2	41.0	4.1	462.7	32.1	2.2	490.0	41.7	4.9	
极差	39.9	23.2	3.1	30.9	18.6	1.3	50.5	25.2	3.8	
平均值	447.6	26.8	1.9	448.1	23.5	1.5	459.9	25.6	2.0	
变异系数/%	2.6	25.1	51.5	1.2	20.4	23.7	2.1	30.4	59.7	

注:同列不同字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。

2.2 C、N、P 计量比的变化

羊胡子草、芒草、野菊花生长期内 C/N 平均值分别为 17.6、19.9 和 19.3(表 2),物种间差异不显著($P > 0.05$)。羊胡子草、野菊花 C/N 值在 7 月份最大,芒草在 10 月份最大。8、9 月份比值下降,生长末期比值显著增加,变化规律与生长季节相关。羊胡子草、芒草、野菊花生长期内 C/P 平均值为 279.9、311.0 和 268.6,物种间差异显著($P < 0.05$)。3 种植物 C/P 最大值出现的时间并不一致,但与其他月份差异显著($P < 0.05$)。3 种植物 C/P 值变化规律也不相同。羊胡子草、芒草、野菊花生长期内 N/P 平均值为 15.4、16.3 和 14.1,物种间差异不显著($P > 0.05$)。3 种植物 N/P 最大值出现的时间并不一致,变化规律各异。研究区 3 种优势草本

植物 C/N/P 平均值为 250/14/1。

生长期内,羊胡子草叶片 C、N、P 比率变异系数表现为 C/P 值(40.6%)>C/N 值(24.9%)>N/P 值(24.6%),芒草叶片表现为 N/P 值(31.8%)>C/P 值(26.0%)>C/N 值(25.9%),野菊花表现为 N/P 值(34.0%)>C/P 值(33.1%)>C/N 值(27.3%)。3 种植物综合变异系数表现为 C/P 值(33.2%)>N/P 值(30.1%)>C/N 值(26.0%)。

Pearson 相关性分析表明,C 含量与 N、P 含量负相关性均不显著($P > 0.05$),P 含量与 N 含量正相关性极显著($r = 0.736, P < 0.01$)。N 含量与 C/N 值负相关性极显著($r = -0.700, P < 0.01$),P 含量与 C/P 值负相关性极显著($r = -0.891, P < 0.01$),C/N 值与 C/P 值正相关性显著($r = 0.283, P < 0.05$)。

表 2 外方山草本植物叶片生长期 C、N、P 比率变化

采样时间/ (年 - 月 - 日)	羊胡子草			芒草			野菊花			平均值 C/N C/P N/P
	C/N	C/P	N/P	C/N	C/P	N/P	C/N	C/P	N/P	
2014-05-30	20.4±1.5a	120.7±14.6e	10.0±0.5c	18.0±3.8bc	218.3±34.5e	13.8±3.4b	12.1±3.4c	102.8±13.5d	8.5±3.4c	13.2 120.3 9.7
2014-06-30	18.7±1.1ab	401.7±56.6a	21.5±3.5a	18.6±4.3bc	347.2±43.8b	21.5±4.5a	22.1±4.2ab	256.7±29.5c	11.6±2.8bc	18.1 292.6 15.5
2014-07-30	23.0±2.1a	368.2±49.9b	16.0±2.6b	20.0±5.4b	452.3±65.7a	5.3±1.2d	25.5±3.6a	309.7±49.5b	12.1±4.6b	22.1 332.7 15.5
2014-08-30	16.8±2.5b	229.2±32.1c	13.6±3.5c	15.6±4.1c	310.6±35.7bc	10.9±1.4c	15.0±2.4b	289.2±34.6bc	19.3±1.5a	15.1 246.1 16.4
2014-09-30	13.7±2.8b	199.1±23.5d	14.5±4.6bc	17.8±3.7c	288.7±34.9c	13.1±2.6b	17.7±2.1b	366.5±54.8a	20.7±3.6a	15.8 244.3 16.4
2014-10-30	22.1±3.5a	370.2±31.6b	16.8±5.9b	30.2±3.9a	259.1±41.3d	13.8±3.5b	24.1±3.1a	297.6±31.8b	12.4±1.9b	22.1 274.4 11.6
平均值	17.6	279.9	15.4	19.9	311.0	16.3	19.3	268.6	14.1	17.7 248.2 14.1
变异系数/%	24.9	40.6	24.6	25.9	26.0	31.8	27.3	33.1	34.0	26.0 33.2 30.1

2.3 C、N、P 含量及计量比的变异来源

表 3 表明,外方山 3 种植物叶片 C、N、P 含量及其计量比的变异受植物种类、采样时间及其交互作用的影响。植物种类对叶片 C 含量差异的影响显

著($P < 0.05$),采样时间影响不显著,植物种类与采样时间的交互影响也显著。叶片 N 含量、P 含量的差异主要来源于采样时间,植物种类及交互作用的影响并不显著。C/N 值与 C/P 值变异来源相同,即

主要受采样时间以及交互作用的影响,而植物种类影响并不显著。N/P值变异不受植物种类、采样时

间及其交互作用的影响。

表3 植物叶片C、N、P含量及计量比重复度量分析

项目	变异来源	离差平方和	df	均方	F
C	植物	1 880.6	2	940.3	18.227 *
	采样时间	582.8	5	116.5	1.081
	植物×时间	876.7	10	254.7	2.654 *
N	植物	33.2	2	16.6	0.388
	采样时间	498.6	5	99.7	6.838 *
	植物×时间	284.7	10	56.5	1.766
P	植物	0.9	2	0.4	0.512
	采样时间	9.5	5	1.9	5.343 *
	植物×时间	2.5	10	1.1	1.324
C/N	植物	16.9	2	8.5	0.344
	采样时间	291.8	5	58.4	7.395 *
	植物×时间	126.7	10	65.4	4.561 *
C/P	植物	5 758.6	2	2 879.3	0.316
	采样时间	90 328.5	5	18 065.7	4.154 *
	植物×时间	45 903.3	10	5 905.3	3.389 *
N/P	植物	15.1	2	7.5	0.351
	采样时间	144.7	5	28.9	1.799
	植物×时间	89.4	10	21.4	1.324

注: * 表示达显著水平。

3 结论与讨论

3.1 C、N、P生态化学计量特征的变化

C、N、P等是植物体最基本的组成元素。植物生长的实质是植物体各器官C、N、P的积累与相对比例的平衡^[15]。研究区内羊胡子草、芒草、野菊花叶片C、N、P含量均随时间的变化而发生了变化。整个生长期,羊胡子草、芒草、野菊花C含量的变异系数分别为2.6%、1.2%和2.1%,N含量为25.1%、20.4%和30.4%,P含量为51.5%、23.7%和59.7%。本试验结果进一步证明了植物叶片器官P含量生长期变化幅度最大,C含量变幅较小,相对稳定。原因是C是生物体最主要结构性物质,含量受外部环境变化影响较小。而N和P是功能性物质,含量受生长季节的影响,与不同时期植物主要的生理功能相协调,也就是植物自身元素含量与生长期采样时间紧密相关^[9,16]。研究区草本植物4月底开始返青,叶片细胞急速分裂,植物调整养分需求,输运更多的N、P物质合成蛋白质和核酸,使得植物叶片初期N、P含量较高,C含量较低^[17]。6—7月份,植物地上生物量增加,稀释了N、P含量^[18-19]。8—9月份羊胡子草等植物生长相对平稳,N、P含量略有回升^[9,19]。10月份,植物叶片开始衰老,N、P向其他器官转运,含量下降^[20-21]。羊胡子草、芒草、野菊花等叶片C、N、P含量随月份的变化与吴统贵等^[9]、贾

庆宇等^[22]的研究结果一致。但与牛得草等^[8]、王冬梅等^[23]和徐沙等^[12]的研究结果并不一致,这可能与植物种类及其生长环境有关,更深层次的原因还需进一步研究。

3.2 C、N、P生态化学计量比的变化

植物生态化学计量学特征因植物种类、生境条件的变化而变化。C、N、P等的化学计量比可用来判定养分限制情况。C/N值和C/P值反映植物的生长速度和N、P的利用效率,N/P值反映N、P的限制情况^[24]。在生长期内,羊胡子草、芒草、野菊花叶片C、N、P生态化学计量比均处于变化之中。P含量对N/P值影响显著,N对N/P值影响不显著,P含量对N/P值的变化起主要作用,这与Gueswell^[25]和吴统贵等^[9]的研究结果一致。Sterner等^[6]认为,生物体的C、N、P计量比与生长率相关性很强,生长率高的生物具有较低的C/P值和N/P值。洛阳外方山草本植物C/N/P值为250/14/1,而北京周边地区草本植被为202/14/1^[24],黄土高原森林草原过渡带为262/15/1^[26],全球陆生植物草本为160/10/1^[27]。本研究中C/N值(17.7)与黄土高原林草过渡带(17.4)接近,而高于北京地区(14.4)和全球(16.0);C/P值(248.2)略低于黄土高原林草过渡带(262),但高于北京地区(202)和全球(160);N/P值(14.1)与北京地区相同,但低于黄土高原林草过渡带(15),高于全球(10)。He等^[28]和任书杰等^[29]认

为,我国植物的 N/P 值高于全球平均值,说明我国植物相对缺 P。Koerselman 等^[4]认为,群落水平上,植物 N/P 值 > 16 表示 P 限制,N/P 值 < 14 表示 N 限制。同一群落内,有的物种是 N 限制,有的物种则是 P 限制,N/P 值不能用来反映物种水平的限制元素。Zhang 等^[30]认为,内蒙古羊草 N/P 值 > 23 时是 P 限制,N/P 值 < 21 时是 N 限制。但是不同种类的植物可能会使养分限制诊断指标的敏感性和适用性不同,N/P 指标具有一定的不稳定性。由于缺乏相关数据支撑,本研究中 N/P 值并不能说明某种元素的限制作用;但却证明了同一生态系统中,种内种间植物体的 C、N、P 化学计量学特征具有多变性的观点^[7]。

N/P 值与其他地区相异的主要原因可能是区域间 C、N、P 含量的差异,指标测定方法、采样部位和试验设计方案可能也影响试验结果。但本研究与其他文献^[8,10,31]得出的植物叶片生态化学计量学特征在生长期具有差异性,说明单次采样所测定的化学计量学特征并不能充分代表某物种的实际情况,多时段、多区域的采样更具科学性。

生活型是植物在相同环境下的外在表现形式,同一生活型植物的结构和功能具有一定的相似性,反映了植物的环境适应与进化的趋同性。C、N、P 化学计量特征体现了植物对环境适应方式的差异^[13]。本研究选取了多年生同一生活型草本植物,但其 C、N、P 含量及计量比的变化规律并不一致,这说明同一生活型植物叶片的生态化学计量特征具有明显的种间异质性^[7],也说明植物养分利用的策略分异性。植物叶片 C、N、P 生态化学计量特征生长期内的变化,使一次性植物叶片采样分析得出的结果不具代表性,特别是对变化幅度较大的 P 而言误差会更大,多时段的多次采样数据更具代表性。

参考文献:

- [1] Ågren G I. The C:N:P stoichiometry of autotrophs-theory and observations [J]. *Ecology Letters*, 2004, 7 (3): 185-191.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Koerselman W, Meuleman A F M. 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.
- [5] 秦海,李俊祥,高三平,等.中国 660 种陆生植物叶片 8 种元素含量特征 [J]. *生态学报*, 2010, 30 (5): 1247-1257.
- [6] Sterner R W, Elser J J. Ecological stoichiometry: The biology of elements from molecules to the biosphere [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [7] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems [J]. *Ecology Letters*, 2000, 3 (6): 540-550.
- [8] 牛得草,董晓玉,傅华.长芒草不同季节碳氮磷生态化学计量特征 [J]. *草业科学*, 2011, 28 (6): 915-920.
- [9] 吴统贵,吴明,刘丽,等.杭州湾滨海湿地 3 种草本植物叶片 N、P 化学计量学的季节变化 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34 (1): 23-28.
- [10] 牛得草,李茜,江世高,等.阿拉善荒漠区 6 种主要灌木植物叶片 C:N:P 化学计量比的季节变化 [J]. *植物生态学报*, 2013, 37 (4): 317-325.
- [11] 羊留冬,杨燕,王根绪,等.短期增温对贡嘎山峨眉冷杉幼苗生长及其 CNP 化学计量学特征的影响 [J]. *生态学报*, 2011, 31 (13): 3668-3676.
- [12] 徐沙,龚吉蕊,张梓榆,等.不同利用方式下草地优势植物的生态化学计量特征 [J]. *草业学报*, 2015, 23 (6): 45-53.
- [13] 张文彦,樊江文,钟华平,等.中国典型草原优势植物功能群氮磷化学计量学特征研究 [J]. *草业学报*, 2010, 18 (4): 503-509.
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法 [M].北京:中国农业科学技术出版社,2000.
- [15] Elser J J, Fagan W F, Kerkhoff A J, et al. Biological stoichiometry of plant production: Metabolism, scaling and ecological response to global change [J]. *New Phytologist*, 2010, 186 (3): 593-608.
- [16] Baldwin D S, Rees G N, Mitchell A M, et al. The short-term effects of salinization on anaerobic nutrient cycling and microbial community structure in sediment from a freshwater wetland [J]. *Wetlands*, 2006, 26 (2): 455-464.
- [17] 孙书存,陈灵芝.东灵山地区辽东栎叶养分的季节动态与回收效率 [J]. *植物生态学报*, 2001, 25 (1): 76-82.
- [18] 闫芊,陆健健,何文珊.崇明东滩湿地高等植被演替特征 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18 (5): 1097-1101.
- [19] Townsend A R, Cleveland C C, Asner G P, et al. Controls over foliar N:P ratios in tropical rain forests [J]. *Ecology*, 2007, 88: 107-118.
- [20] 刘广全,王浩,赵士洞,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.

(下转第 135 页)

- 鸡生产性能的影响 [J]. 饲料研究, 2007(2):19-23.
- [15] Amerah A M, Ravindran V. Effect of coccidia challenge and natural betaine supplementation on performance, nutrient utilization, and intestinal lesion scores of broiler chickens fed suboptimal level of dietary methionine [J]. Poultry Science, 2015, 94(4):673-680.
- [16] He S, Zhao S, Dai S, et al. Effects of dietary betaine on growth performance, fat deposition and serum lipids in broilers subjected to chronic heat stress [J]. Animal Science Journal, 2015, 86(10):897-903.
- [17] Sayed M A, Downing J. Effects of dietary electrolyte balance and addition of electrolyte-betaine supplements in feed or water on performance, acid-base balance and water retention in heat-stressed broilers [J]. British Poultry Science, 2015, 56(2):195-209.
- [18] Zhao X, Yang Z B, Yang W R, et al. Effects of ginger root (*Zingiber officinale*) on laying performance and an-
- tioxidant status of laying hens and on dietary oxidation stability [J]. Poultry Science, 2011, 90(8):1720-1727.
- [19] 安立龙, 杨京京, 李泽英, 等. 叶黄素 - 中药合剂对热应激蛋鸡行为与生产性能的影响 [J]. 家畜生态学报, 2014, 35(7):21-26.
- [20] Popovic L M, Mitic N R, Miric D, et al. Influence of vitamin C supplementation on oxidative stress and neutrophil inflammatory response in acute and regular exercise [J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2015(5):295497.
- [21] 安立龙, 效梅, 黄志毅, 等. 不同剂量甜菜碱对热应激肉鸡组织器官发育的影响 [J]. 家畜生态学报, 2005, 26(3):40-46.
- [22] Endo K, Kanno E, Oshima Y. Structures of antifungal diarylheptenones, gingerenones A, B, C and isogingerenone B, isolated from the rhizomes of *Zingiber officinale* [J]. Phytochemistry, 1990, 29(3):797-799.

(上接第 124 页)

- [21] Lin Y, Sternberg L. Nitrogen and phosphorus dynamics and nutrient resorption of *Rhizophora mangle* leaves in south Florida, USA [J]. Bulletin of Marine Science, 2007, 80(1):159-169.
- [22] 贾庆宇, 周广胜, 周莉, 等. 湿地芦苇植株氮素分布动态特征分析 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(4):858-864.
- [23] 王冬梅, 杨惠敏. 4 种牧草不同生长期 C、N 生态化学计量特征 [J]. 草业科学, 2011, 28(6):921-925.
- [24] 韩文轩, 吴漪, 汤璐瑛, 等. 北京及周边地区植物叶的碳氮磷元素计量特征 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009, 45(5):855-860.
- [25] Guesewell S. N:P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance [J]. New Phytologist, 2004, 164(2):243-266.
- [26] Zheng S X, Shangguan Z P. Spatial patterns of leaf nutrient traits of the plants in the Loess Plateau of China [J]. Trees, 2007, 191(2):279-293.
- [27] Zhang L X, Bai Y F, Han X G. Application of N:P stoichiometry to ecology studies [J]. Acta Botanica Sinica, 2003, 45(9):1009-1019.
- [28] He J S, Fang J Y, Wang Z H, et al. Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China [J]. Oecologia, 2006, 149(1):115-122.
- [29] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等. 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.
- [30] Zhang L X, Bai Y F, Han X G. Differential responses of N:P stoichiometry of *Leymus chinensis* and *Carex korshinskyi* to N additions in a steppe ecosystem in Nei Mongol [J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(3):259-270.
- [31] Orgeas J, Ourcival J M, Bonin G. Seasonal and spatial patterns of foliar nutrients in cork oak (*Quercus suber* L.) growing on siliceous soils in Provence (France) [J]. Plant Ecology, 2002, 164:201-211.