

王维奇 徐玲琳,曾从盛 仝川 张林海. 河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报 2011 31(23):7119-7124.
Wang W Q ,Xu L L ,Zeng C S ,Tong C ,Zhang L H. Carbon , nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios among live plant-litter-soil systems in estuarine wetland. Acta Ecologica Sinica 2011 31(23):7119-7124.

河口湿地植物活体-枯落物-土壤的 碳氮磷生态化学计量特征

王维奇^{1 2 3,*} 徐玲琳³ 曾从盛^{1 2 3} 仝川^{1 2 3} 张林海^{1 2 3}

(1. 湿润亚热带生态-地理过程部省部共建教育部重点实验室 福州 350007; 2. 福建师范大学亚热带湿地研究中心 福州 350007;
3. 福建师范大学地理科学学院 福州 350007)

摘要:碳(C)、氮(N)、磷(P)生态化学计量比是生态系统过程及其功能的重要特征。以闽江河口的芦苇(*Phragmites australis*)和短叶茳苳(*Cyperus malaccensis* var. *brevifolius*)湿地为对象,开展植物活体-枯落物-土壤系统的C、N、P季节动态研究。结果表明:芦苇和短叶茳苳植物活体、枯落物和土壤年均C、N、P含量为C>N>P,两种湿地系统C、N含量均为植物活体和枯落物高于土壤,但与土壤P含量大小关系因植物构件差异而不同;芦苇和短叶茳苳植物活体、枯落物和土壤的C、N、P生态化学计量比表现为C:P>C:N>N:P;芦苇湿地C:N为枯落物>植物活体>土壤,短叶茳苳为植物活体>枯落物>土壤,而C:P和N:P均为枯落物>植物活体>土壤;C、N、P化学计量比可以反映湿地C、N、P交换过程和植物群落的生态功能。

关键词:C、N、P;生态化学计量特征;植物;土壤;闽江河口

Carbon , nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios among live plant-litter-soil systems in estuarine wetland

WANG Weiqi^{1 2 3,*} , XU Linglin³ , ZENG Congsheng^{1 2 3} , TONG Chuan^{1 2 3} , ZHANG Linhai^{1 2 3}

1 Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education , Fuzhou 350007 , China

2 Research Center of Wetlands in Subtropical Region , Fujian Normal University , Fuzhou 350007 , China

3 School of Geographical Science , Fujian Normal University , Fuzhou 350007 , China

Abstract: The ecological stoichiometric ratios of carbon (C) , nitrogen (N) and phosphorus (P) are the properties of ecosystem process and function. The seasonal dynamics of C , N and P in live plant-litter-soil system were measured in *Phragmites australis* and *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius* wetlands from Minjiang River estuary. The results showed that seasonal averaged C , N and P concentrations were C>N>P in live plant , litter and soil. C and N concentrations were higher in live plant , litter than soil and the order of P concentration was uncertain between various plant organs and soil. Seasonal averaged C , N , P stoichiometric ratios were C:P>C:N>N:P in live plant , litter and soil in the two wetlands. C:N in *P. australis* wetland was in order of litter>live plant>soil , while they were in order of live plant>litter>soil in *C. malaccensis* var. *brevifolius* wetland. C:P and N:P were litter>live plant>soil in both wetlands. The C , N , P stoichiometric ratios may reflect the exchange of C , N , P and the ecological function of plant community.

Key Words: C , N , P; ecological stoichiometry; plant; soil; Minjiang River estuary

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31000209;31000262);福建省科技计划重点项目(2009R10039-1);福建省自然科学基金资助项目(2010J01139)

收稿日期:2010-09-30; 修订日期:2011-12-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangweiqi15@163.com

土壤是植物生长所需养分的主要来源,对调节植物生长具有重要作用。植物通过光合作用固定 C,同时将部分 C 转移到土壤,并以枯落物的形式将 C 和养分逐步补偿给土壤。枯落物分解过程中养分的返还量、土壤养分供应量、植物养分需求量以及植物对其自身养分需求的自我调节^[1],使得植物活体-枯落物-土壤系统养分含量具有明显的时空变化。同时,也增加了植物活体-枯落物-土壤 C、N、P 之间相关关系的复杂性^[2]。

作为研究生物系统能量和多种元素平衡的生态化学计量学^[3],为探究植物与土壤之间的 C、N、P 相关性及其植物生长与养分供应的关系提供了有效手段^[4-5]。植物结构性元素 C 和限制性元素 N、P 相互作用,调节着植物的生长^[4-6]。当前我国学者对植物生长过程中生态系统 C、N、P 生态化学计量学特征研究主要是对植物 C、N、P 生态化学计量学特征的一些研究^[7-9]。也有对不同湿地植物群落下的土壤 C、N、P 生态化学计量学特征的垂直变异性进行了探讨^[10],在此进一步对闽江河口芦苇(*Phragmites australis*)和短叶茼蒿(*Cyperus malaccensis* var. *brevifolius*)两种优势湿地群落植物活体-枯落物-土壤 C、N、P 生态化学计量学特征季节动态进行分析,以揭示 C、N、P 在植物与土壤中的交换过程与格局。

1 材料与方法

1.1 研究区与采样点

选择闽江河口鳝鱼滩湿地作为研究区域^[11]。芦苇和短叶茼蒿是鳝鱼滩湿地的主要优势群落,分布于鳝鱼滩湿地的中高潮滩,其面积大,范围广,常组成单优势种。芦苇,植株高大,地上茎每节生 1 个叶片,叶片披针形或宽条形,有明显的地下根状茎,比较粗大,中空,春季为分蘖期和生长发育期,成熟期株高约为 2 m;而短叶茼蒿,成簇生长,茎呈三棱形,叶着生于地上茎基部,地下茎匍匐横生表土层,成熟期株高约为 1.5 m^[12-13]。采样点选择在鳝鱼滩湿地中部(119°37'31"E, 26°01'46"N)。冬季采集的芦苇枯落物的分解速率要慢于短叶茼蒿^[14]。芦苇湿地土壤理化特征与短叶茼蒿湿地相比,具有较低的 pH 和容重、较高的盐度^[15]。芦苇湿地和短叶茼蒿湿地植物形态特征、枯落物分解速率以及湿地土壤特性的差异,为探讨不同湿地植物群落对植物活体-枯落物-土壤系统 C、N、P 循环的影响提供了理想的实验地。

1.2 样品采集及测定方法

样品采集于 2007 年 5 月(春季)、7 月(夏季)、9 月(秋季)和 12 月(冬季)。芦苇生长季节主要是春季、夏季和秋季,而冬季为非主要生长季,枯落物一年四季均存在。短叶茼蒿叶只采集到了春季、夏季和秋季的植物活体叶,春季的叶枯落物,茎活体和茎枯落物一年四季也均存在。作为多年生植物,两种植物一年四季也都有活体根的存在,采样点样方为 50 m × 50 m,采样时在每个群落中各选取 3 个 1 m × 1 m 样方进行采样。样地选择、样品采集、预处理和样品的测定参见文献^[12-13]。同时,在采集植物样品的同一样方,采集表层土壤样品(0—15 cm 植物根主要分布层次) 3 个重复,自然风干,过 60 目筛,土壤 C、N、P 的测定分别采用重铬酸钾外加热法^[16]、凯氏定 N 法(K-370 瑞士生产)和紫外分光光度法(UV-2450,日本生产),土壤盐度和 pH 采用电位法测定(DDS-307 型电导仪和奥立龙 868 型酸度计),容重用环刀法进行测定。

1.3 统计分析

应用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 统计分析软件对测定数据进行整理。各统计数据以平均值及标准误差表示,采用 One-Way ANOVA 对湿地 C、N、P 含量, C:N、C:P 和 N:P 以及植物活体、枯落物和土壤相应 C、N、P 含量, C:N、C:P 和 N:P 进行差异性检验,环境因子与 C:N、C:P 和 N:P 的相关性分析采用 Pearson 相关分析。为了揭示植物活体、枯落物和土壤间 C:N、C:P 和 N:P 的关系,分别采用线性、对数和指数模型对 3 个子系统 C:N、C:P 和 N:P 进行拟合,数值为各组成子系统的平均值。

2 结果与分析

2.1 植物活体-枯落物-土壤 C、N、P 含量特征

从年均值看,芦苇和短叶茼蒿植物活体、枯落物和土壤 C、N、P 含量为 C>N>P($P<0.01$)。芦苇湿地系统和短叶茼蒿湿地系统 C、N 含量表现为植物活体与枯落物高于土壤(表 1)($P<0.01$),但与土壤 P 含量大小关系因植物构件差异而不同(表 1)。此外,植物活体叶的 C、N、P 含量高于茎和根。

表 1 植物活体-枯落物-土壤年均 C、N、P 含量特征

Table 1 Averaged C, N, P content of live plant, litter and soil

类型 Type	组成 Composition	器官 Organ	C/(mg/g)	N/(mg/g)	P/(mg/g)		
芦苇湿地 <i>Phragmites australis</i> wetland	植物活体 Live plant	叶 Leaf	419.6±7.3(9)	30.0±4.2(9)	1.7±0.3(9)		
		茎 Stem	418.9±2.3(9)	10.6±1.2(9)	0.9±0.2(9)		
		0—15cm 根 Root	385.9±6.1(12)	10.1±0.4(12)	0.9±0.2(12)		
		15—30cm 根 Root		359.9±13.7(12)	9.3±0.3(12)	0.7±0.2(12)	
			30—60cm 根 Root		334.0±8.0(12)	7.8±0.3(12)	0.6±0.1(12)
	枯落物 Litter	叶 Leaf	386.7±9.1(12)	14.5±1.2(12)	0.9±0.2(12)		
		茎 Stem	423.6±7.6(12)	8.5±1.0(12)	0.5±0.1(12)		
		土壤 Soil	0—15 cm	19.4±0.8(12)	2.2±0.2(12)	0.8±0.3(12)	
短叶茳芩湿地 <i>Cyperus malaccensis</i> var. <i>brevifolius</i> wetland	植物活体 Live plant	叶 Leaf	410.2±11.7(9)	20.4±2.1(9)	2.1±0.3(9)		
		茎 Stem	396.0±5.2(12)	12.1±1.5(12)	1.9±0.2(12)		
		0—15 cm 根 Root	398.6±16.7(12)	8.9±0.4(12)	1.4±0.2(12)		
		15—30 cm 根 Root		368.9±17.8(12)	7.7±0.4(12)	1.0±0.1(12)	
			30—60 cm 根 Root		321.7±24.1(12)	6.7±0.4(12)	0.8±0.1(12)
	枯落物 Litter	叶 Leaf	368.0±0.0(3)	17.9±0.0(3)	1.8±0.0(3)		
		茎 Stem	385.3±6.6(12)	10.6±0.5(12)	1.0±0.1(12)		
		土壤 Soil	0—15 cm	18.2±0.7(12)	2.0±0.2(12)	0.8±0.3(12)	

表中数据为平均值±标准误差(样本量) 短叶茳芩仅在春季采集到叶枯落物 标准误差表示为 0.0

2.2 植物活体-枯落物-土壤 C、N、P 生态化学计量学特征

2.2.1 植物活体-枯落物-土壤 C:N、C:P 和 N:P 特征

从年均值看, 芦苇和短叶茳芩植物活体、枯落物和土壤 C、N、P 生态化学计量比为 C:P>C:N>N:P ($P<0.01$)。芦苇湿地 C:N 为枯落物>植物活体 ($P>0.05$)>土壤 ($P<0.01$) , 而短叶茳芩湿地 C:N 为植物活体>枯落物 ($P<0.05$)>土壤 ($P<0.01$) , 芦苇湿地和短叶茳芩湿地 C:P 和 N:P 均为枯落物>植物活体>土壤(图 1) , 芦苇湿地植物活体、枯落物、土壤 C:P 之间存在极显著差异 ($P<0.01$) , 短叶茳芩湿地植物活体与枯落物 C:P 之间差异不显著 ($P>0.05$) , 但均与土壤 C:P 之间存在极显著差异 ($P<0.01$) , 芦苇湿地和短叶茳芩湿地植物活体、枯落物、土壤 N:P 之间存在极显著差异 ($P<0.01$)。

2.2.2 植物活体-枯落物-土壤 C:N、C:P 和 N:P 相关性

闽江河口芦苇和短叶茳芩植物活体与枯落物 C:N ($P<0.01$ 和 $P<0.01$, 图 2) 、芦苇 C:P ($P<0.05$) 均为正相关, 但短叶茳芩 C:P 相关性不显著 ($P>0.05$) , 两种植物活体与枯落物 N:P 均不显著 ($P>0.05$) ; 植物活体与土壤 N:P ($P<0.01$ 和 $P<0.05$, 图 2) 均呈现负相关, C:N 和 C:P 相关性不显著 ($P>0.05$) ; 枯落物与土壤 C:N、C:P 和 N:P 相关性均不显著 ($P>0.05$)。

3 讨论

芦苇和短叶茳芩湿地 C:N、C:P 和 N:P 具有明显的季节变化, 这与 Ladanai 等^[2]对森林生态系统的研究结果相似。在主要生长季节(春季、夏季、秋季), 芦苇和短叶茳芩植物活体的平均 C:N 均表现为夏季出现峰值, 与植物在生长旺盛季节高效的 C 固定密切相关。C:P 和 N:P 在秋季达到最大值, 主要是因为植物生长减慢并开始衰老枯黄, 植物活体内的 P 元素开始发生转移, 最终形成了较高的 C:P 和 N:P。枯落物 C:N、C:P 和 N:P 的变化与植物活体表现出一致的规律, 这与枯落物秉承了植物活体的特性密切相关。土壤 C:N、C:P 和 N:P 的季节动态除了受到植物养分吸收和枯落物分解养分释放的影响外, 在 pH、盐度和容重几个因子中, 盐度对芦苇湿地和短叶茳芩湿地土壤 C:N、C:P 和 N:P 季节变化的影响较为显著 ($P<0.05$) , 这与王维奇等^[10]对本区域芦苇和短叶茳芩湿地土壤 C:N、C:P 和 N:P 剖面垂直变化的影响因子的研究结论相似。可见, 盐度是影响芦苇湿地和短叶茳芩湿地土壤 C:N、C:P 和 N:P 时空变化的主要因子之一。

C、N、P 生态化学计量比是生态系统过程及其功能的重要特征。一般认为较低的枯落物 C:N 具有较高的

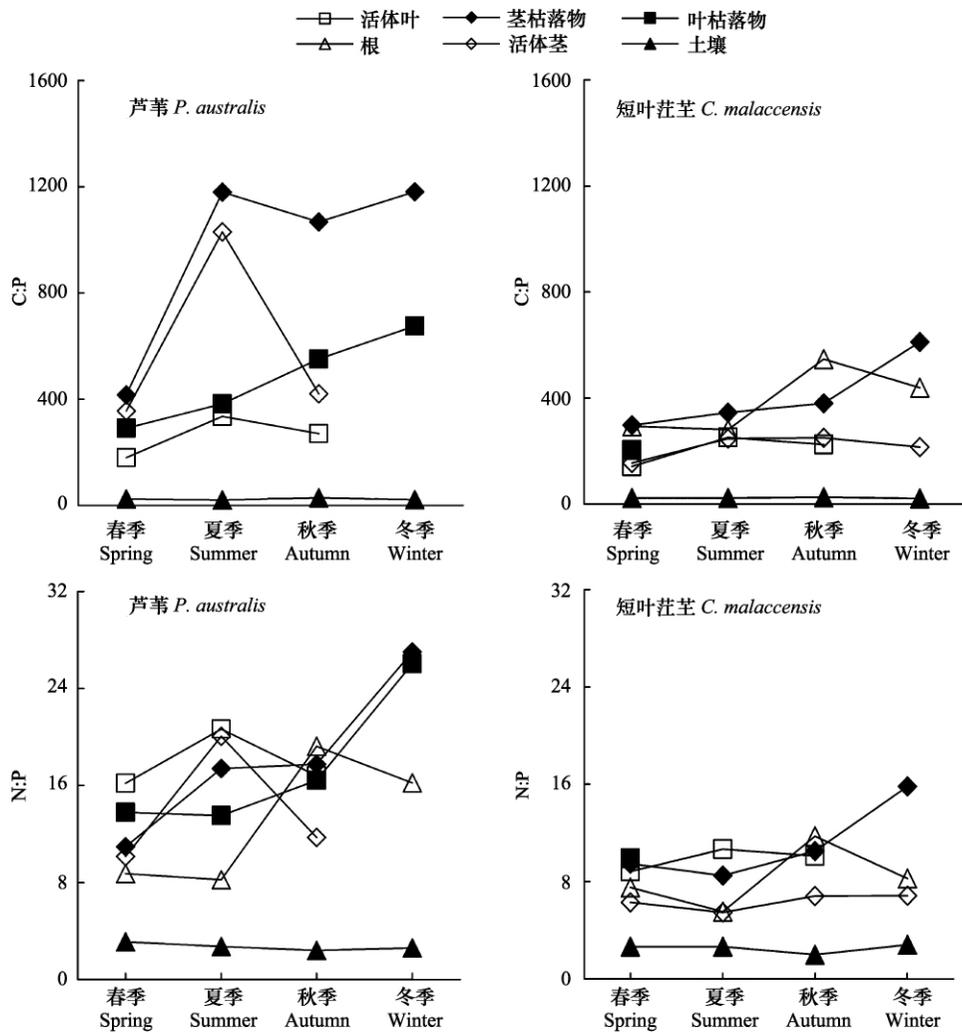


图1 植物活体-枯落物-土壤 C:N, C:P, N:P
Fig. 1 C:N, C:P, N:P of live plant, litter and soil

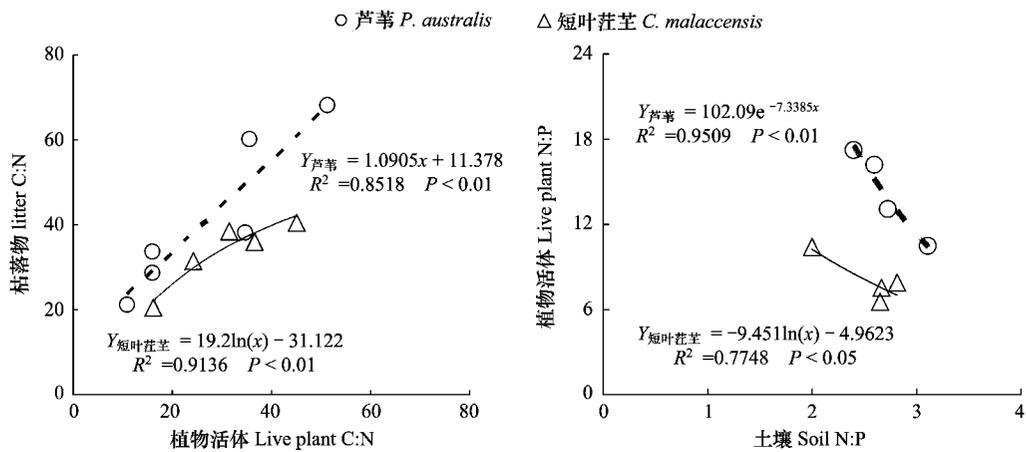


图2 植物活体与枯落物C:N、土壤N:P的相关性
Fig. 2 Relationships of C:N between live plant and litter or N:P between live plant and soil

分解速率^[17],这与本研究中芦苇枯落物的C:N高于短叶荳芑,分解速率低于短叶荳芑^[14]的结论相吻合。此

外, 王维奇等^[18]的研究也发现, 土壤 C 分解速率与土壤 C:N 存在显著的负相关。所以 C:N 可以作为预测有机质分解速率的一个很好的指标^[19]。C:P 和 N:P 可以很好的反映植物的生长速率, 低的 C:P 和 N:P 表征植物较快的生长速率^[19]。实测数据显示, 芦苇植物 C:P、N:P 高于短叶茳茳, 这与芦苇较低的生长速率相一致。

N 和 P 是植物生长过程中最常见的限制性元素^[20], 对植物各种功能影响深刻^[21]。通常可用植物叶片的 N:P 来表征植物生长的限制性养分^[17, 22]。以 Koerselman 和 Meuleman 的理论^[23]作为判断依据, 本研究中主要生长季节芦苇的生长容易受到 P 的限制, 短叶茳茳生长过程中容易受到 N 的限制; 以 Garnier 的理论^[24]作为判断依据, 芦苇和短叶茳茳主要生长季节均受到 N 限制。可见, 两种方法对短叶茳茳植物生长的限制性养分判断结论一致, 而对芦苇生长限制性养分的判断结论不同。因此, 今后需深入开展不同浓度梯度的养分原位添加实验来检验植物生长过程中的限制性养分, 以期得出更加可信的结论。

致谢: 本研究在野外采样和室内样品分析过程中得到了福建师范大学雷波、刘白贵、闫宗平等同学的帮助, 在此一并致谢。

References:

- [1] Ågren G I, Bosatta E. Theoretical Ecosystem Ecology—Understanding Element Cycles. Cambridge: Cambridge University Press, 1998: 234–234.
- [2] Ladanaï S, Ågren G I, Olsson B A. Relationships between tree and soil properties in *Picea abies* and *Pinus sylvestris* forests in Sweden. *Ecosystems*, 2010, 13(2): 302–316.
- [3] 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 J. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540–550.
- [4] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, Gruner D S, Harpole W S, Hillebrand H, Ngai J T, Seabloom E W, Shurin J B, Smith J E. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135–1142.
- [5] Ågren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematic*, 2008, 39: 153–170.
- [6] Elser J J, Urabe J. The stoichiometry of consumer-driven nutrient recycling: theory, observations, and consequences. *Ecology*, 1999, 80(3): 540–550.
- [7] Gao S P, Li J X, Xu M C, Chen X, Dai J. Leaf N and P stoichiometry of common species in successional stages of the evergreen broad-leaved forest in Tiantong Nation Forest Park, Zhejiang Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 947–952.
- [8] Ren S J, Yu G R, Tao B, Guan L L, Fang H J, Jiang C M. Spatial patterns for variations in leaf nutrient contents of Dahurian larch (*Larix gmelinii* Rupr.). *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 1899–1906.
- [9] Han W X, Fang J Y, Guo D L, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377–385.
- [10] Wang W Q, Tong C, Jia R X, Zeng C S. Ecological stoichiometry characteristics of wetland soil carbon, nitrogen and phosphorus in different water-flooded frequency. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3): 238–242.
- [11] Liu J Q, Zeng C S, Chen N. Research of Minjiang River Estuary Wetland. Beijing: Science Press, 2005. (未链接到本条英文标题信息)
- [12] Zhang L H, Zeng C S, Tong C. Study on biomass dynamics of *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* in the wetlands of Minjiang River estuary. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2008, 3(2): 25–33.
- [13] Zeng C S, Zhang L H, Tong C. Seasonal variation of nitrogen and phosphorus concentration and accumulation of *Cyperus malaccensis* in Minjiang River estuary. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(5): 788–794.
- [14] Tong C, Liu B G. Litter decomposition and nutrient dynamics in different tidal water submergence environments of estuarine tidal wetland. *Geographical Research*, 2009, 28(1): 118–128.
- [15] Jia R X, Tong C, Wang W Q, Zeng C S. Organic carbon contents and storages in the salt marsh sediments in the Min River estuary. *Wetland Science*, 2008, 6(4): 492–499.
- [16] Lu R K. Analysis Methods of Soil Science and Agricultural Chemistry. Beijing: Agriculture Science and Technology Press, 1999.
- [17] Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3937–3947.
- [18] Wang W Q, Tong C, Zeng C S. Stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen, phosphorus and anaerobic carbon decomposition of wetland soil of

different texture. *China Environmental Science*, 2010, 30(10): 1130–1134.

- [19] Elser J J, Acharya K, Kyle M, Cotner J, Makino W, Watts T, Hobbie S, Fagan W, Schade J, Hood J, Sterner R W. Growth rate–stoichiometry couplings in diverse biota. *Ecology Letters*, 2003, 6(10): 936–943.
- [20] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur? *Biogeochemistry*, 1991, 13(2): 87–115.
- [21] Reich P B, Walters M B, Ellsworth D S. From tropics to tundra: global convergence in plant functioning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, 94(25): 13730–13734.
- [22] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(3): 523–534.
- [23] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N: P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441–1450.
- [24] Garnier E. Interspecific variation in plasticity of grasses in response to nitrogen supply // Cheplick G P, ed. *Population Biology of Grasses*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998: 155–181.

参考文献:

- [7] 高三平, 李俊祥, 徐明策, 陈熙, 戴洁. 天童常绿阔叶林不同演替阶段常见种叶片 N、P 化学计量学特征. *生态学报*, 2007, 27(3): 947–952.
- [8] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 官丽莉, 方华军, 姜春明. 兴安落叶松 (*Larix gmelinii* Rupr.) 叶片养分的空间分布格局. *生态学报*, 2009, 29(4): 1899–1906.
- [10] 王维奇, 仝川, 贾瑞霞, 曾从盛. 不同淹水频率下湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 238–242.
- [11] 刘剑秋, 曾从盛, 陈宁. 闽江河口湿地研究. 北京: 科学出版社, 2005.
- [12] 张林海, 曾从盛, 仝川. 闽江河口湿地芦苇和互花米草生物量季节动态研究. *亚热带资源与环境学报*, 2008, 3(2): 25–33.
- [13] 曾从盛, 张林海, 仝川. 闽江河口湿地短叶茛苳氮、磷含量与积累量季节变化. *生态学杂志*, 2009, 28(5): 788–794.
- [14] 仝川, 刘白贵. 不同水淹环境下河口感潮湿地枯落物分解及营养动态. *地理研究*, 2009, 28(1): 118–128.
- [15] 贾瑞霞, 仝川, 王维奇, 曾从盛. 闽江河口盐沼湿地沉积物有机碳含量及储量特征. *湿地科学*, 2008, 6(4): 492–499.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [17] 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. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937–3947.
- [18] 王维奇, 仝川, 曾从盛. 不同质地湿地土壤碳、氮、磷计量学及厌氧碳分解特征. *中国环境科学*, 2010, 30(10): 1130–1134.