

城市绿化植物-凋落物-土壤系统 碳氮磷化学计量特征研究

王亚军¹, 郁珊珊^{2*}

(1 福州大学 建筑学院, 福州 350108; 2 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建厦门 361005)

摘要:以福建福州市常见的 15 种乔木、灌木和草本绿化植物为对象, 连续 2 年取样测定了这些植物、凋落物、立地土壤、土壤微生物量 C、N、P 含量, 探讨城市绿化植物-凋落物-土壤系统生态化学计量特征, 为中国城市绿化植物的生态功能恢复与植被重建提供科学依据。结果表明: (1) 绿化植物不同器官 C、N、P 含量均表现为草本>灌木>乔木, C 含量>N 含量>P 含量、叶>茎>根, 呈现出叶的富集作用; 绿化植物各器官化学计量比(C/N、C/P、N/P) 也表现出基本一致的乔木>灌木>草本的变化趋势; 各绿化植物对 N 的再吸收率极显著高于对 P 的再吸收率($P<0.01$), 绿化植物 N 和 P 再吸收率表现为乔木>灌木>草本, 不同绿化植物对 N 的再吸收率差异均显著($P<0.05$), 对 P 的再吸收率差异均不显著($P>0.05$)。 (2) 绿化植物凋落物 C、N、P 含量基本表现为草本>灌木>乔木, 其中不同绿化植物凋落物 P 含量差异不显著。 (3) 绿化植物立地土壤 C、N、P 含量表现为草本>灌木>乔木, 但其 N/P 差异不显著; 土壤微生物量 C、N、P 含量基本表现为草本>灌木>乔木, 其相应的 C/N、C/P、N/P 差异均不显著。 (4) 植物-土壤-凋落物-土壤微生物量(C、N、P) 均随着生长季温度的升高而降低, 随着年降水量的增加而升高, P 素的回归系数绝对值明显低于 C 素和 N 素; 植物-凋落物-土壤的 C 与 N 含量、N 与 P 含量、C/P 与 N/P、以及土壤和植物的 C/N 与 N/P 之间均呈显著正相关关系, 而凋落物的 C/N 与 N/P 之间呈显著负相关关系; 典范对应 CCA 排序中, 植物高度、冠幅、茎粗、比叶面积和叶面积指数对植物-凋落物-土壤-土壤微生物量 C、N、P 含量和 C/N、C/P 和 N/P 具有较大影响作用, 其中高度、冠幅和茎粗与比叶面积和叶面积指数呈负相关关系, 与凋落物-土壤-土壤微生物量 C、N、P 含量呈负相关关系, 与植物 C、N、P 含量呈正相关关系; 而凋落物-土壤-土壤微生物量 C、N、P 含量与其 C/N、C/P 和 N/P 均具有一定的正相关关系。

关键词:城市绿化植物; 凋落物; 土壤; 生态化学计量

中图分类号: Q945.12; Q948.1; S154.4 **文献标志码:** A

Ecological Stoichiometric Characteristics of Plants, Litter and Soils of Urban Green Plants

WANG Yajun¹, YU Shanshan^{2*}

(1 College of Architecture, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2 School of Architecture and Civil Engineering, Xiameng University, Xiameng, Fujian 361005, China)

Abstract: This paper discusses the ecological stoichiometric characteristics of plants, litter and soils of urban green plants. The results were as follows: (1) the order of average contents of C, N and P in green

收稿日期: 2016-08-20; **修改稿收到日期:** 2017-01-02

基金项目: 福建省自然科学基金面上项目(2016J01732)

作者简介: 王亚军(1977-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事风景园林规划与设计、景观与生态规划、风景园林工程与设计方法。E-mail: fjwangyajun@163.com

* 通信作者: 郁珊珊, 博士, 助教, 主要从事风景园林规划与设计、城市绿地系统规划。E-mail: yushanhan_81@163.com

plants from high to low as follows arbors>shrubs> herbs, and the contents of C, N and P in same ornamental plants of different organs was differ, which showed leaf>stem>root. (2) The nitrogen absorptivity was significantly higher than that of phosphorus absorptivity of urban green plants ($P<0.01$), and the nitrogen and phosphorus absorptivity showed arbors>shrubs> herbs, which the nitrogen absorptivity of arbors, shrubs and herbs had a significant difference ($P<0.05$) and the phosphorus absorptivity had no significant difference ($P>0.05$). (3) The contents of C, N and P in litter showed herbs > shrubs > arbors, which the content of P had no significant difference. The contents of C, N and P in soil showed herbs > shrubs > arbors, which the N/P had no significant difference. The contents of C, N and P in soil microbial biomass showed herbs > shrubs > arbors, which the C/N, C/P and N/P had no significant difference. (4) The contents of C, N and P of plants, litter, soils and soil microbial biomass decreased with the increasing of the temperature of the growing season and increased with the increasing of the annual precipitation, which the absolute value of regression coefficient of P was lower than that of C and N. (5) The contents of C and N in plants, litter and soils had a significant positive correlation. The contents of N and P in plants, litter and soils had a significant positive correlation. The C/N and N/P in litter had a significant negative correlation. The C/N and N/P in plants and soils had a significant positive correlation. The C/N and N/P in plants, litter and soils had a significant positive correlation. (6) Canonical correspondence analysis showed that the plant height, crown, stem diameter, specific leaf area and leaf area index had a large effect on the contents of C, N, P and C/N, C/P and N/P of plant, litter, soil and soil microbial biomass. The plant height, crown, stem diameter had a negative correlation with specific leaf area and leaf area index, and had a negative correlation with the contents of C, N, P of litter, soil and soil microbial biomass, and had a positive correlation with the contents of C, N, P of plants, while the contents of C, N, P and C/N, C/P and N/P had a positive correlation in litter, soil and soil microbial biomass. This study provides a scientific guidance for restoration of the urban green plants in China.

Key words: urban green plants; litter; soil; ecological stoichiometry

生态化学计量学(ecological stoichiometry)是综合生态学和化学计量学的一门综合性学科,也是研究生态系统物质、能量相平衡和碳(C)、氮(N)、磷(P)、钾(K)等多种化学元素的耦合作用的综合方法和科学理论^[1-2]。C、P、N 是一种结构性的元素,在生态系统发生过程中(物质、能量循环和元素平衡)发挥着重要作用^[1-2]。植物不同器官 C、N、P 含量是研究植物的养分利用状况的重要手段,叶片将营养元素(C、P、N)转移和呈递给土壤,土壤对营养元素进行一定的自我调节,使得植物和土壤营养元素具有明显的时空分异特征,这也增加了土壤和植物之间对于营养元素交换的复杂性及可变性^[3]。为了适应外界环境的变迁,植物将主动地调整对 C、N、P 等元素的需求及其相对丰度,然而外界环境中 C、N、P 的变迁又将导致植物体内生态化学计量(C/N 和 C/P)的变化,而环境的变化在一定程度上能够反映出植物 N 和 P 受限情况^[3]。凋落物作为生态系统养分(主要是有机质含量)储藏库和植物与土壤之间物质、能量交换的重要枢纽,对生态系统养分循环和能量流动起着重要的作用^[4]。与此同时,土壤养分的积累主要源于不同形式凋落物的归还,植物通过

光合作用固 C,将一部分 C 转移给土壤,同时以凋落物的形式将 C 逐步补偿土壤^[5]。而植物养分需求量、土壤养分供应量、植物的自我调节以及凋落物分解过程中养分的归还量又相互作用和影响,使得“植物-凋落物-土壤”系统元素含量及其比值具有一定的复杂性^[5]。而作为研究生态系统物质、能量以及元素相互平衡的“生态化学计量学”,为揭示 C、N、P 等元素在“植物-凋落物-土壤”生物地球化学循环过程中的比例关系和规律提供了有效的研究手段和科学方法。

城市绿化植物以其较高的生态适应性,具有明显的独立的景观、时空节奏和独特的园林意境,发挥着城市-自然-景观复合生态系统自净功能,并且在城市化生态环境过程中具有重要的贡献^[6];城市绿化植物-土壤-凋落物 C、P、N 作为城市生态系统的主要元素,对城市生态系统的结构和功能平衡起着重要作用。因此,开展全面城市绿化植物生态化学计量比研究,一方面能够深入了解城市绿化植物生长过程中元素分配及其利用状况;另一方面对于揭示城市绿化植物的元素需求、养分转移和累积具有重要意义^[7]。从目前的研究成果来看,对于城市绿

化生态系统的研究主要集中在服务功能及价值评估、生态系统形成和演化、景观格局动态及历史变迁等方面^[8],而关于城市绿化植物-土壤-凋落物生态化学计量特征比例及其驱动性因素的研究尚属空白。有鉴于此,本研究结合生态化学计量学的基本理论和科学方法,初步探讨城市绿化植物生态化学计量比例、元素循环与系统稳定性之间的平衡及耦合关系,旨在揭示城市绿化植物元素循环驱动机制,为理解中国区域(城市生态系统)生态化学计量学及其元素分配比例、不同部位养分格局的趋同与分异提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

福州市位于闽江下游,地理坐标为 25°15′~26°39′N、118°08′~120°31′E,该区气候资源极为丰富,雨量充沛,霜少无雪,四季分明,温暖湿润,地形复杂多样,地势起伏不平,地貌类型以丘陵为主;土壤类型主要包括紫色土、黄棕壤、红壤、潮土和沼泽土,无霜期达 326 d,平均海拔约为 9.2 m,年均日照数约为 1 700~1 980 h,年均降水量为 900~2 100 mm,年均气温为 16~20 ℃,年相对湿度约 77%。福州市土地总面积为 1 2251 km²,绿地面积 81.2 km²,绿地覆盖率达 36.9%,而人均绿地高达 11.2 m²。

1.2 研究方法

依据福州市绿化植物的种类及其分布,2014 年和 2015 年 8 月分别在福州市区不同街道采集乔木(枫杨、枫香、银杏、悬铃木和香樟)、灌木(朱槿、枇杷、夹竹桃、石榴和杜鹃)、草本(月季、鸢尾、彩叶草、天门冬和美人蕉)等 15 种绿化植物(每种绿化植物选取 10 株并标记,统计结果见表 1,统计数据为 2014—2015 的 2 年数据平均值),采集和挖取整株绿化植物,其中乔木和灌木选择性挖取部分根,枝修剪取部分茎和叶片,草本则挖取整株带回实验室,然后按照根茎叶将其分开,叶片分别从不同方向 and 不同部位均匀收集,10 株绿化植物根、茎、叶分别充分混合,然后在 105 ℃杀青 0.5 h,70 ℃烘干至恒重(48 h),粉碎过 40 目筛备用;另外每种植物的叶片用车载保温冰箱取 10 片新鲜叶子(4 ℃保存),带回实验室用扫描仪和 Photoshop 软件计算单个叶面积指数,然后将 10 片新鲜叶子 70 ℃烘干(48 h)后称重,计算其比叶面积。

土壤与植物完成同时取样,采用四分法采集每种植物根围土壤,取样深度为 0—20 cm,10 份新鲜土壤样品充分混合,一部分新鲜样品 4 ℃保存用于测定土壤微生物量,另一部分土壤经自然风干 15 d,去除石块、植物残体等残杂物,研磨并过 2 mm 筛后备用。

表 1 不同绿化植物生长特点

Table 1 The growth characteristics of different urban green plants

	项目 Item	高度 Height/m	冠幅 Crown/cm	茎粗 Diameter/cm	比叶面积 Specific leaf area /(cm ² · g ⁻¹)	叶面积指数 Leaf area index
乔木 Arbor	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	16.34	12.40	13.61	10.62	59.33
	枫杨 <i>Pterocarya stenoptera</i>	18.52	9.82	13.92	11.36	16.80
	银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	12.93	5.65	8.25	9.83	32.42
	悬铃木 <i>Platanus</i>	13.69	8.37	15.96	13.59	48.75
	香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	8.18	6.23	7.32	11.72	24.28
灌木 Shrubs	朱槿 <i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	2.62	3.46	5.34	10.30	25.99
	枇杷 <i>Eriobotrya japonica</i>	3.73	1.89	3.57	9.23	62.31
	夹竹桃 <i>Nerium indicum</i>	4.64	3.91	3.18	8.31	26.34
	石榴 <i>Punica granatum</i>	2.41	1.64	2.79	9.44	8.37
	杜鹃 <i>Rhododendron simsii</i>	0.96	1.17	0.65	8.57	9.18
草本 Herbs	月季 <i>Rosa chinensis</i>	0.72	0.68	0.13	13.48	8.33
	鸢尾 <i>Iris tectorum</i>	0.65	0.43	0.26	11.32	45.91
	彩叶草 <i>Coleus blumei</i>	0.32	0.23	0.09	13.95	32.47
	天门冬 <i>Asparagus cochinchinensis</i>	0.52	0.38	0.17	14.86	8.35
	美人蕉 <i>Canna indica</i>	0.44	0.26	0.34	12.72	69.14

1.3 样品测定及数据处理

采用元素分析仪测定土壤、植物 C 和 N 含量；NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定土壤、植物 P 含量；氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法测定土壤微生物量 C、N、P^[9]。

采用 Excel 2010 进行数据的统计和计算,SPSS 18.0 对数据进行回归分析和单因素方差分析(One-way ANOVA)。SPSS 对于样本数据分布检验结果表明:植物、凋落物、土壤样本的 C、N、P 含量均呈现出非正态分布,而将数据进行对数转换后均呈正态分布,因此,我们采用原始数据的几何平均值代表 C、N、P 含量。植物 C、N、P 含量采用枝和叶 C、N、P 元素含量的平均值加权计算。植物的 N、P 再吸收率用植物与凋落物 N、P 含量差与植物 N、P 含量比值来表示,其计算公式如下^[10]:

$$N(P)\text{再吸收率}(\%) = \frac{\text{植物 } N(P)\text{含量} - \text{凋落物 } N(P)\text{含量}}{\text{植物 } N(P)\text{含量}} \times 100\%$$

2 结果与分析

2.1 城市绿化植物不同器官化学计量特征

2.1.1 器官 C、N、P 含量特征 由表 2 可知,不同绿化植物相同器官 C、N 和 P 含量具有明显的差异且大多达到显著水平($P<0.05$),并大致表现为草本>灌木>乔木的变化规律;不同绿化植物相同器官 C、N、P 含量基本表现为 C 含量>N 含量>P 含量;相同植物的不同器官 C、N 和 P 含量不尽一致,但均表现为叶>茎>根,并且叶 C、N、P 含量远高于

根和茎 C、N、P 含量,均呈现出明显的叶的富集作用。相对而言,P 含量在不同绿化植物各器官没有明显的差异,尤其是根 P 含量在植物间差异并不显著($P>0.05$)。

2.1.2 器官化学计量特征 由表 3 可知,相同器官中化学计量比在不同绿化植物间具有明显的差异,但各个器官化学计量比变化的趋势相一致,基本表现为乔木>灌木>草本,且其间差异大多达到显著水平;同时,同种植物中不同器官的化学计量比也不尽一致。其中,C/N 均值表现为根>茎>叶,根部 C/N 在不同绿化植物间差异均显著($P<0.05$),茎部 C/N 表现为灌木和乔木相近($P>0.05$)而显著高于草本,叶片 C/N 表现为灌木和草本相近而显著低于乔木;C/P 均值表现为根>叶>茎,根部 C/P 表现为灌木和草本相近而显著低于乔木,茎部和叶片 C/P 在不同绿化植物间差异均显著;N/P 均值表现为叶>根>茎,根部 N/P 表现为草本显著高于灌木和乔木,而乔木和灌木间相近,茎部 N/P 表现为草本和乔木相近而显著高于灌木,叶片 N/P 在不同绿化植物间差异均不显著。

2.1.3 N、P 养分再吸收率特征 由图 1 可知,不同类绿化植物的 N 再吸收率均极显著高于 P 再吸收率($P<0.01$);不同绿化植物的 N 再吸收率变化范围在 35.7%~43.2%,基本表现为乔木>灌木>草本,并且乔木、灌木和草本的 N 再吸收率差异均显著($P<0.05$);不同绿化植物的 P 再吸收率变化范围

表 2 城市绿化植物不同器官 C、N、P 含量特征(平均值±标准误差)

Table 2 The contents of C, N and P in different organs of urban green plants (Mean ± SD)

项目 Item	C/(g·kg ⁻¹)			N/(g·kg ⁻¹)			P/(g·kg ⁻¹)		
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
乔木 Arbor	314.8±15.6 c	321.4±11.3 c	415.4±16.3 c	11.7±1.3 c	14.2±0.7 b	17.3±0.8 b	0.76±0.08 a	0.92±0.08 b	0.95±0.13 b
灌木 Shrubs	324.7±11.8 b	352.9±12.4 b	462.3±15.2 b	13.5±0.9 b	15.3±2.1 b	23.8±1.1 a	0.86±0.11 a	1.23±0.17 a	1.32±0.15 a
草本 Herbs	335.6±12.3 a	382.4±15.7 a	475.6±19.3 a	16.1±0.8 a	17.9±1.3 a	24.6±1.6 a	0.89±0.15 a	1.25±0.21 a	1.43±0.28 a
均值 Mean	352.0±10.4	352.2±30.5	451.1±31.6	13.8±2.2	15.8±1.9	21.9±4.0	0.84±0.07	1.13±0.19	1.23±0.25

注: 同列不同小写字母表示植物间在 0.05 水平存在显著性差异,下同
Note: Different lowercase letters in every column indicate significant differences among plants at 0.05 level; The same as below

表 3 城市绿化植物不同器官化学计量特征(平均值±标准误差)

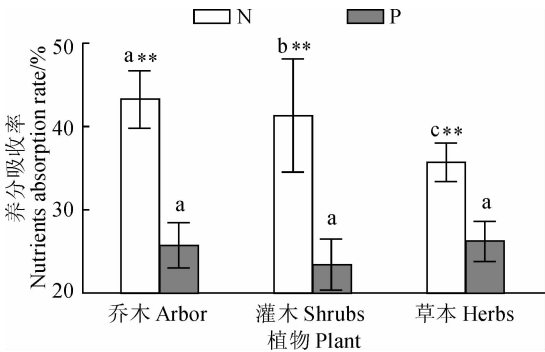
Table 3 The characteristics of ecological stoichiometry in different organs of urban green plants (Mean ± SD)

项目 Item	C/N			C/P			N/P		
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
乔木 Arbor	26.9±1.3 a	22.6±0.7 a	24.0±1.7 a	414.2±17.8 a	349.3±11.4 a	437.3±14.7 a	15.4±1.2 b	15.4±1.4 a	18.2±1.3 a
灌木 Shrubs	24.1±1.6 b	23.1±0.3 a	19.4±1.5 b	377.6±13.4 b	286.9±15.7 c	350.2±19.3 b	15.7±1.3 b	12.4±1.2 b	18.0±1.6 a
草本 Herbs	20.8±1.2 c	21.4±0.8 b	19.3±1.6 b	377.1±15.2 b	305.9±13.4 b	332.6±16.2 c	18.1±0.8 a	14.3±0.9 a	17.2±0.8 a
均值 Mean	23.9±3.0	22.4±0.9	20.9±2.7	389.6±21.3	314.1±32.0	373.4±56.0	16.4±1.5	14.1±1.5	17.8±0.5

在 23.4%~26.2%,基本表现为乔木>灌木>草本,并且乔木、灌木和草本的 P 再吸收率差异均不显著($P>0.05$)。

2.2 城市绿化植物凋落物化学计量特征

不同绿化植物凋落物 C、N、P 含量及化学计量



相同指标内不同小写字母表示植物间在 0.05 水平存在显著性差异, ** 表示同一植物内 P、N 吸收率间在 0.01 水平存在显著性差异;下同。

图 1 城市绿化植物 N、P 养分再吸收率特征

Different lowercase letters indicate significant differences among plants at 0.05 level. ** mean N and P absorption in the same plant had a significant difference at 0.01 level; The same as below

Fig. 1 The N and P absorption of urban green plants

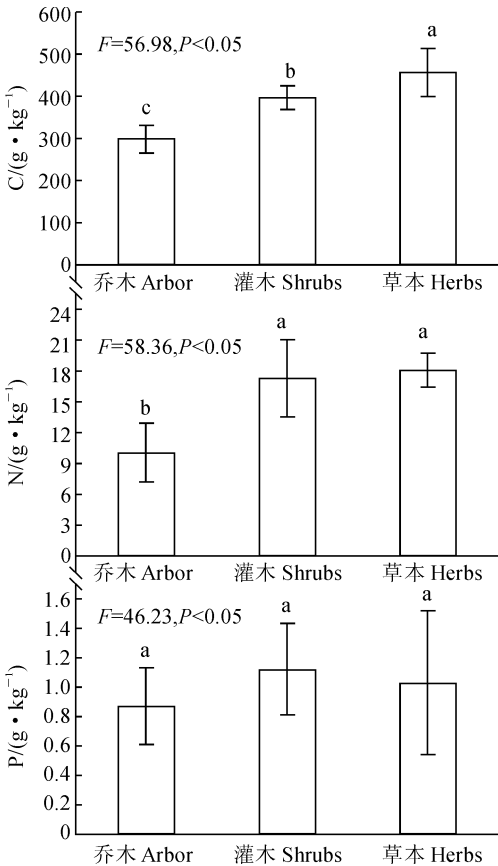


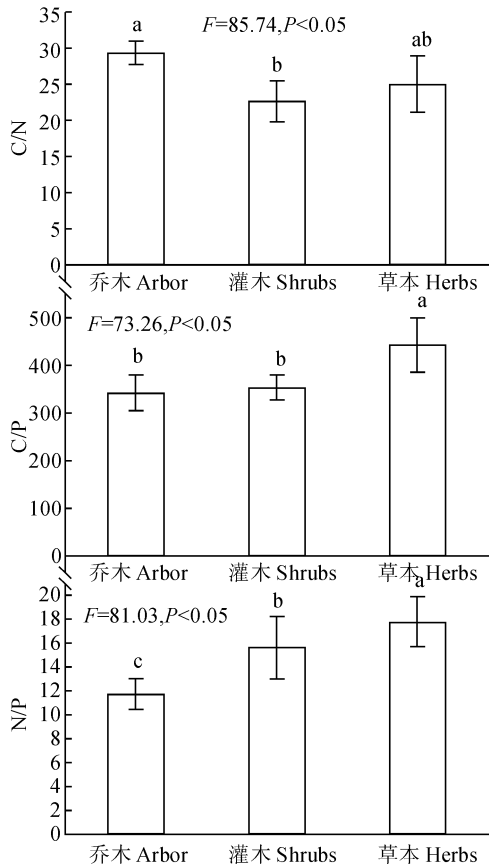
图 2 城市绿化植物凋落物化学计量特征

Fig. 2 The characteristics of ecological stoichiometry in litters of urban green plants

比具有较大的差异,且 C 含量远高于 N、P 含量,C/P 远高于 C/N 和 N/P(图 2)。凋落物 C 含量变化在 298.7~456.9 g · kg⁻¹之间,基本表现为草本>灌木>乔木,且三者间差异均达到显著水平($P<0.05$);凋落物 N 含量变化在 10.2~18.3 g · kg⁻¹之间,也基本表现为草本>灌木>乔木,其中的灌木和草本相近并显著高于乔木($P<0.05$);凋落物 P 含量变化在 0.87~1.12 g · kg⁻¹之间,且不同绿化植物间差异均不显著($P>0.05$)。同时,凋落物化学计量比 C/N 处于 22.6~29.3 之间,并表现为乔木>草本>灌木,但仅乔木与灌木差异显著;凋落物 C/P 处于 343.3~443.6 之间,表现为草本>灌木>乔木,草本显著高于乔木和灌木,而后两者间差异不显著;凋落物 N/P 处于 11.7~17.8 之间,表现为草本>灌木>乔木,且不同绿化植物间差异均达到显著水平($P<0.05$)。

2.3 城市绿化植物立地土壤化学计量特征

不同绿化植物立地土壤 C、N、P 含量及化学计量比也具有较大的差异,且 C 含量仍高于 N、P 含量,C/P 也高于 C/N 和 N/P,但不如不同绿化植物及其凋落物相应指标间差异幅度大(图 3)。各植物



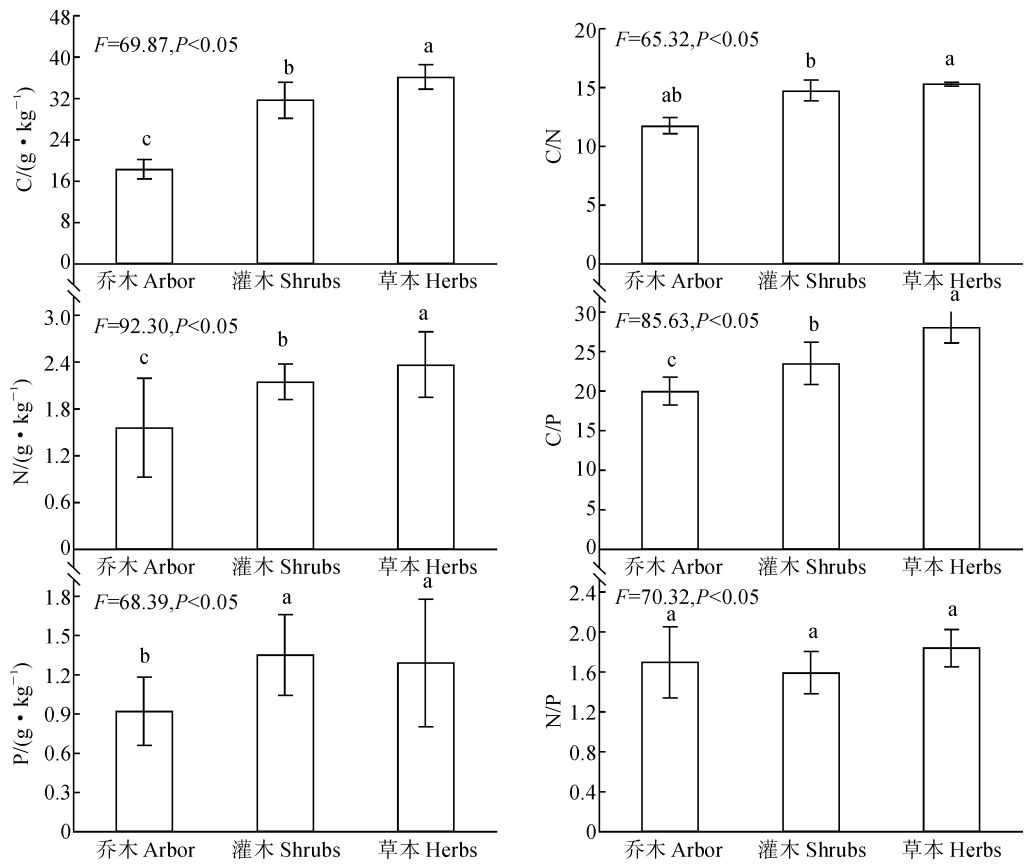


图 3 城市绿化植物立地土壤化学计量特征

Fig. 3 The characteristics of ecological stoichiometry in soils of urban green plants

立地土壤 C、N、P 含量分别处于 18.3~36.2、1.56~2.37 和 0.92~1.35 g·kg⁻¹ 之间,且均基本表现为草本>灌木>乔木,草本与灌木立地土壤的 C、N 含量均差异显著,而其 P 含量差异不显著,灌木与乔木立地土壤的 C、N、P 含量均差异显著($P<0.05$)。同时,立地土壤 C/N、C/P 分别处于 11.7~15.3 和 19.9~28.1 之间,均表现为草本>灌木>乔木,但 C/N 仅在草本与灌木间差异显著,而 C/P 在不同绿化植物间差异均显著($P<0.05$);立地土壤 N/P 处在 1.6~1.9 之间,其不同绿化植物间差异均不显著($P>0.05$)。

2.4 城市绿化植物立地土壤微生物量化学计量特征

与绿化植物、凋落物及立地土壤表现相似,不同绿化植物立地土壤微生物量 C、N、P 含量及化学计量比也具有较大的差异(图 4)。各绿化植物土壤微生物量 C、N 和 P 含量变化范围分别在 412.3~612.5、42.3~68.9 和 4.38~6.52 mg·kg⁻¹ 之间,均表现为草本>灌木>乔木,且不同绿化植物间差异均达到显著水平($P<0.05$);各绿化植物土壤微生物量 C/N、C/P 和 N/P 分别处在 9.05~9.74、

94.1~97.5 和 9.66~10.57 之间,它们在乔木、灌木、草本间均差异不显著($P>0.05$)。

2.5 城市绿化植物-凋落物-土壤化学计量特征之间及其与环境因子、植物形态的关系

2.5.1 立地土壤 C、N、P 含量与气温和降雨量关系

由表 4 可知,以城市绿化植物生长季气温和年降雨量为自变量 x ,其立地土壤、凋落物和土壤微生物量 C、N、P 含量为因变量 y ,回归分析结果(表 4)表明,城市绿化植物立地土壤、凋落物和土壤微生物量 C、N、P 含量均随着生长季温度升高而降低(回归系数为负),随着年降水量的增加而升高(回归系数为正),其中 P 素的回归系数绝对值均低于 C 和 N 素。

2.5.2 化学计量特征间相关性 “植物-凋落物-土壤”连续体主要元素含量以及 C/N、C/P、N/P 之间的

相关分析结果(图 5)表明:城市绿化植物、凋落物和土壤的 C 与 N 含量之间、P 与 N 含量之间均呈极显著正相关关系;经过对数转换后的凋落物的 C/N 与 N/P 之间呈极显著负相关关系,而土壤和植物的 C/N 与 N/P 之间均呈极显著正相关关系;经过对数转换后的植物、凋落物和土壤的 C/P 与 N/P 之间均呈极显著正相关关系。

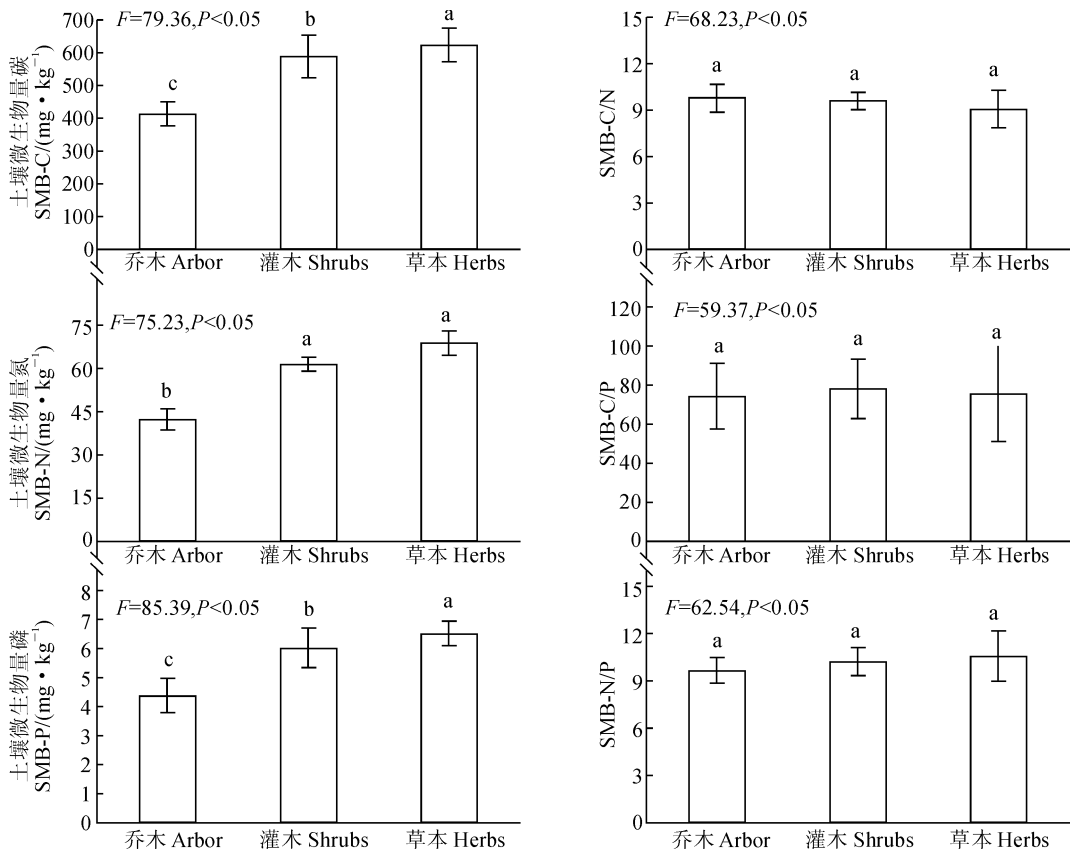


图 4 城市绿化植物立地土壤微生物量化学计量特征

Fig. 4 The characteristics of ecological stoichiometry in soil microbial biomass of urban green plants

表 4 土壤养分与环境因子逐步回归分析

Table 4 Correlation analysis of the soil ecological stoichiometry and plants-litters ecological stoichiometry

因变量 Dependent variable y		自变量 Independent variable x	回归系数 Regression coefficient	P	F
土壤 Soil	C	x ₁	−0.98	0.000***	98.36
		x ₂	5.23	0.000**	123.68
	N	x ₁	−1.26	0.008**	84.23
		x ₂	4.98	0.000***	116.57
	P	x ₁	−0.85	0.013*	69.35
		x ₂	4.21	0.009**	89.79
凋落物 Litter	C	x ₁	−0.36	0.006**	103.24
		x ₂	3.98	0.003**	114.58
	N	x ₁	−0.58	0.002**	86.35
		x ₂	5.63	0.041*	92.41
	P	x ₁	−0.98	0.032*	39.65
		x ₂	5.01	0.016*	89.30
土壤微生物量 SMB	C	x ₁	−1.23	0.009**	102.31
		x ₂	4.88	0.000***	86.06
	N	x ₁	−1.02	0.016**	87.25
		x ₂	3.26	0.005**	92.17
	P	x ₁	−0.93	0.023*	91.46
		x ₂	3.47	0.045*	113.58

注: x₁. 生长季气温; x₂. 年降雨量; *, ** 和 *** 分别表示 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$

Note: x₁. The growing season temperature; x₂. Annual precipitation; *, ** and *** stand for $P<0.05$, $P<0.01$ and $P<0.001$, respectively

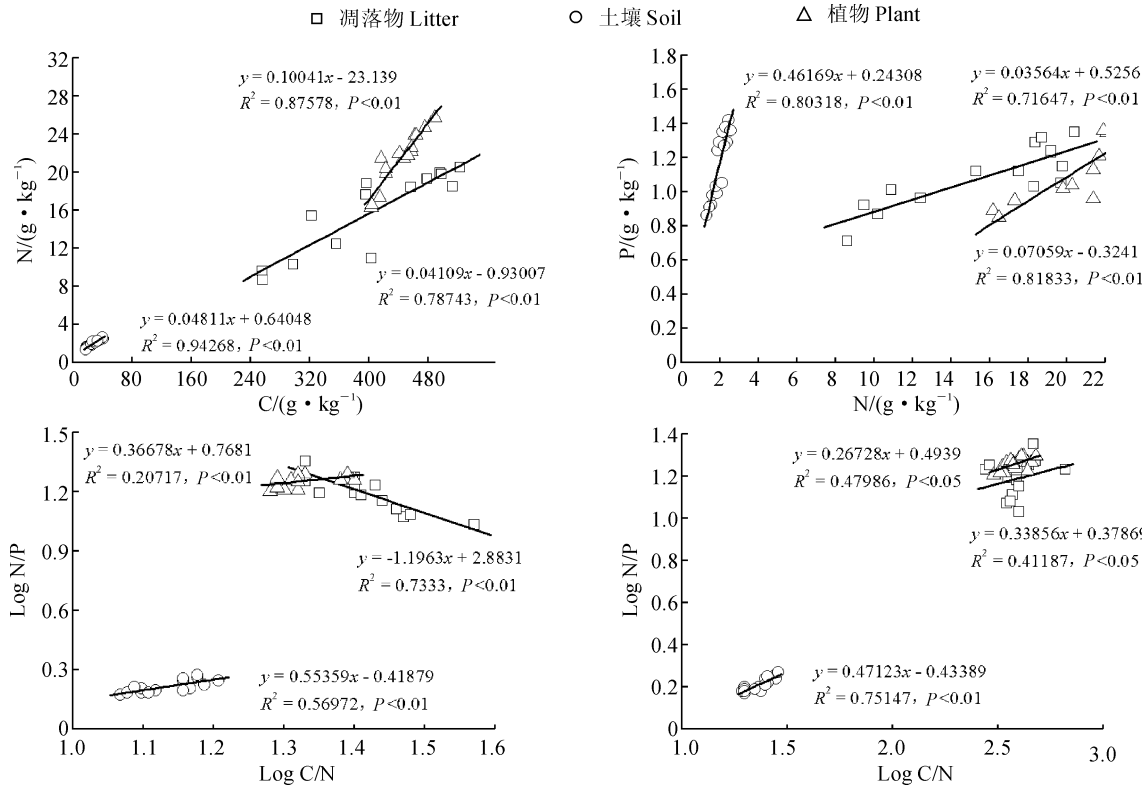


图 5 城市绿化植物化学计量特征间相关性

Fig. 5 Correlation between the ecological stoichiometry of urban green plants

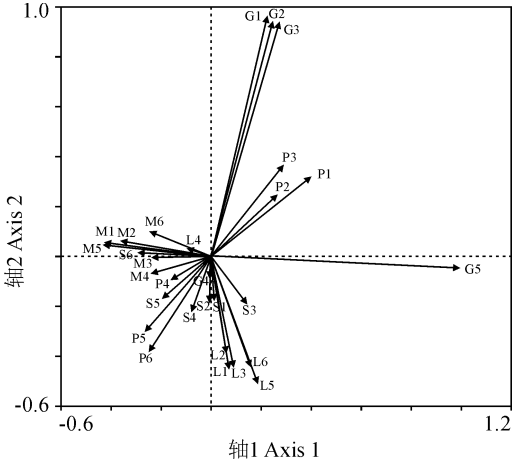


图 6 城市绿化植物-凋落物-土壤 C、N、P 的 CCA 排序图
G1. 高度; G2. 冠幅; G3. 茎粗; G4. 比叶面积; G5. 叶面积指数;
M1. 微生物量碳; M2. 微生物量氮; M3. 微生物量磷; M4. 微生物量 C/N; M5. 微生物量 C/P; M6. 微生物量 N/P; P1. 植物碳; P2. 植物氮; P3. 植物磷; P4. 植物 C/N; P5. 植物 C/P; P6. 植物 N/P; S1. 土壤碳; S2. 土壤氮; S3. 土壤磷; S4. 土壤 C/N; S5. 土壤 C/P; S6. 土壤 N/P; L1. 凋落物碳; L2. 凋落物氮; L3. 凋落物磷; L4. 凋落物 C/N; L5. 凋落物 C/P; L6. 凋落物 N/P

Fig. 6 Redundancy analysis (RDA) showing the relationship between the leaves-root-soil-litters ecological stoichiometry and soil environmental variables

2.5.3 典范对应 CCA 排序分析 采用典范对应 CCA 排序进一步研究不同绿化植物高度、冠幅、茎粗、比叶面积和叶面积指数与植物-凋落物-土壤-土壤微生物量 C、N、P 含量和 C/N、C/P 和 N/P 之间的关系。由图 6 可知,待解释变量和环境因子在第 1、第 2、第 3 和第 4 排序轴的相关性分别为 0.912、0.863、0.312、0.158 ($P = 0.002, F = 9.26$),表明植物高度、冠幅和茎粗对植物 C、N 和 P 含量具有较大直接影响(影响为正),而比叶面积和叶面积指数对土壤、凋落物和土壤微生物量 C、N 和 P 含量具有较大直接影响(影响为正)。

沿第 1 排序轴,随着比叶面积和叶面积指数的增加,土壤-土壤微生物量 C、N、P 含量和 C/N、C/P 和 N/P 降低;沿第 2 排序轴,随着植物高度、冠幅和茎粗的增加,凋落物-土壤-土壤微生物量 C、N、P 含量和 C/N、C/P 和 N/P 逐渐降低。由此说明植物高度、冠幅、茎粗、比叶面积和叶面积指数对植物-凋落物-土壤-土壤微生物量 C、N、P 含量和 C/N、C/P 和 N/P 具有较大影响作用。从排序图中还可以看出,不同绿化植物高度、冠幅和茎粗与比叶面积和叶面积指数呈负相关,与凋落物-土壤-土壤微生物量 C、N、P 含量呈负相关,与植物 C、N、P 含量呈正相关;而凋落物-土壤-土壤微生物量 C、N、P 含量与 C/N、

C/P 和 N/P 均具有一定的正相关。

3 讨 论

3.1 植物-凋落物-土壤体系 C、N、P 含量特征与养分再吸收率

C 是构成生命体的主要元素, N 和 P 是组成蛋白质和遗传物质的基本元素, 对生命体各种结构和功能具有重要影响, 其中结构性元素 C 和功能限制性元素 N、P 之间共同对生命体起着一定的调节作用^[4]。本研究中, 绿化植物叶片 C 含量平均值($451.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)略低于全球陆生植物叶片 C 的平均含量($464 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[4,11], 其原因可能是由不同区域的土壤元素的可利用性及其环境因子所决定, 同时绿化植物叶片 N 含量($21.9 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)高于全球陆地植物叶片 N 平均含量($20.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[4,11]。有研究表明^[12], 中国陆地植物叶片 P 含量低于全球植物叶片 P 含量, 本研究中绿化植物叶片 P 含量平均值($1.23 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)明显低于全球陆地植物叶片 P 含量平均值($1.77 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 而接近中国 753 种陆地植物的研究结果($1.21 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[13], 产生这种结果主要与绿化植物生长节律和叶片基本属性有着密切的关系^[14]。从均值来看, 不同绿化植物叶片 C、N、P 含量均高于根系, 主要是由于叶片作为光合作用的主要部位, 积累了大量糖和有机物质, 导致叶片具有较高的 C 含量^[12-13]。

凋落物是土壤养分归还的有效途径, 也是生物地球化循环的重要组成部分^[14]。本研究中, 绿化植物凋落物中 C、N 和 P 的平均含量依次为 383.9、15.3 和 $1.01 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 与全球平均水平^[4,11]相比, 凋落物中 C 的含量相对较低, 而 N 的含量略高, P 的含量相当, 呈现出低 C 高 N 的分布格局; 通过计量比可知, 绿化植物凋落物具有相对较低的 C/N, 在一定程度上绿化植物凋落物秉承了植物的基本性质。本研究中绿化植物立地土壤 C、N 和 P 含量平均值分别为 28.7、2.03、 $1.19 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 其中表层土壤 C、N、P 含量较高, 造成土壤微生物量 C、N、P 含量也偏高。

植物的养分再吸收率能够充分反映植物对养分的利用以及适应能力。当土壤、植物 C、N、P 含量较低时, 植物会加快对于营养养分元素的利用效率^[15-16]。本研究中城市绿化植物日照充足, 有利于植物合成和积累有机化合物, 但该区植物叶片养分含量却较低, 绿化植物为解决养分不足的问题必须改变其养分利用策略, 因此植物对于养分的再吸收

作用显得相当重要。本研究中, 不同绿化植物 N 再吸收率范围为 35.7%~43.2%, 基本表现为乔木>灌木>草本; P 再吸收率范围在 23.4%~26.2%之间, 不同绿化植物 N 再吸收率显著高于 P 再吸收率($P<0.01$), 当土壤中的元素供应相对缺乏时, 植物会增强对该元素的再吸收能力, 进而呈现出较高的再吸收率。此外, 绿化植物 N、P 再吸收率均明显低于 Han 等^[7]对全球植物 N、P 的再吸收率的平均值(分别为 57.4%、60.7%)和木本植物 N、P 再吸收率(分别为 49.1%和 51.0%), 说明了绿化植物在生长过程中可能以提高养分吸收能力的方式适应环境的变化。

3.2 植物-土壤-凋落物体系 C、N、P 化学计量比

通过对比可知, 绿化植物凋落物 C/N、C/P、N/P 分别为 25.6、380.2 和 15.0, 而乔木的凋落物具有较高的 N/P 值和较低的 P 含量, 乔木凋落物的分解较慢并主要受 P 的限制更强, 草本凋落物分解速率则相对较快。植物 C/N 和 C/P 可以反映出植物对 N 和 P 元素的有效利用效率和土壤中 N、P 的供应状况。本研究不同绿化植物具有较高的 C/N 和 C/P, 一方面可能因为城市绿化植物需要吸收更多的 N 和 P 来加快自身的生长; 另一方面, C 并不是植物的限制性元素, 因为在大多数植物体中均具有较高的 C 含量, 因此, N 和 P 含量及其比值的变化是影响绿化植物对 N 和 P 吸收的主要因素。

土壤 C/N/P 是反映土壤营养元素平衡的重要指示指标和参数^[17]。根据以往的研究报告, 全球土壤 C/N 平均值为 13.33^[17], 中国土壤 C/N 平均值在 10:1~12:1 之间^[17], 本研究中不同绿化植物土壤 C/N 范围在 10.10~10.93 之间, 介于中国土壤 C/N 平均值之间。有研究报告指出^[12], 较低的土壤 C/N 和 C/P 是衡量 N 和 P 有效性的指标之一, 绿化植物土壤具有较低的 C/N 和 C/P, 初步说明了在自然条件下, 绿化植物的生长更容易受土壤 N 和 P 含量的限制。

在生态化学计量学的研究中, 可以根据植物叶片的 N/P 来判断环境中植物养分受限状况, 且 N/P 能够很好地反映出植物的生长速率^[12]; 然而 N/P 在不同生态系统的阈值至今仍未得到统一的定论^[17]。Koerselman 和 Meuleman^[17-18]的施肥实验表明, 在 N/P 小于 14 的情况下, 生态系统受 N 限制, 在 N/P 大于 16 的情况下, 生态系统受 P 限制, 而 N/P 在 14~16 之间时, 该生态系统受到 N 和 P 的共同限制。而 Güsewell^[18]的研究表明: N/P 小

于 10 时,植物受 N 限制,N/P 大于 20 时,植被受 P 限制,N/P 介于 10~20 之间时,受到 N 和 P 的共同限制。N/P 的阈值会受到研究区域、生态系统及植物种类之间的差异及环境的影响^[19]。在本研究中,不同绿化植物叶片 N/P 平均值为 16.1,介于 14.1~17.8 之间,与中国森林叶片的平均值基本一致^[7];凋落物 N/P 平均值为 15.0,介于 11.7~17.8 之间,大于全球木本植物凋落物 N/P 平均值^[19]。由此我们可以推测,本研究中不同绿化植物可能存在 P 素的亏缺,但其 N/P 的临界值还需要通过 N、P 添加实验来确定。

C、N、P 元素循环在“植物-凋落物-土壤”连续体之间是可以相互转换和影响的,C、N、P 元素计量特征及相关性能够反映出生态系统养分循环速率及其养分利用效率和受限状况。相关性结果显示,绿化植物-土壤-凋落物 N 和 P 含量呈极显著的正相关($P<0.01$),并且 N/P 从植物到凋落物再到土壤中依次降低。这主要是由于土壤的 N 和 P 供给植物

吸收,而叶片在凋落前对 N、P 进行重吸收,导致凋落物 C/N、C/P 均高于植物体内 C/N、C/P,再加上地理条件和自然气候的差异,绿化植物叶片的 N、P 含量和 C/N/P 存在较大尺度的变异^[19]。对植物、土壤 C、N、P 含量与叶片 C、N、P 含量的相关分析结果表明,土壤 C 含量与叶片 C 含量呈极显著的相关关系($P<0.01$),由此说明不同绿化植物叶片 C 含量主要依赖于土壤 C 含量,同时也间接说明了植物对营养元素的需求与土壤营养元素种类的供应一致,并且受土壤中营养元素的影响;从本研究可知,土壤 P 含量对植物叶片 P 含量的影响并不大,我们可以推测绿化植物叶片较低的 P 含量可能并不是土壤 P 含量较低所导致。绿化植物对元素的吸收和运输是生态系统发生的复杂过程,受植物生活史、进化史、遗传漂变和环境因子的影响,研究植物 C、N、P 及其生态计量特征还需综合考虑多种因素;另外,在大尺度区域开展“植物-凋落物-土壤”连续体的 C、N、P 生态化学计量学研究是未来研究的重点。

参考文献:

[1] MULDER C, ELSER J J. Soil acidity, ecological stoichiometry and allometric scaling in grassland food webs[J]. *Global Change Biology*, 2009, **15**(11): 2 730-2 738.

[2] ALLEN A P, GILLOOLY J F. Towards an integration of ecological stoichiometry and the metabolic theory of ecology to better understand nutrient cycling[J]. *Ecology Letters*, 2009, **12**(5): 369-384.

[3] MOE S J, STELZER R S, FORMAN M R, *et al.* Recent advances in ecological stoichiometry: insights for population and community ecology[J]. *Oikos*, 2005, **109**(1): 29-39.

[4] CROSS W F, BENSTEADJ P, *et al.* Ecological stoichiometry in freshwater benthic systems: recent progress and perspectives[J]. *Freshwater Biology*, 2005, **50**(11): 1 895-1 912.

[5] ZENG D, CHEN G. Ecological stoichiometry: a science to explore the complexity of living systems[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2004, **29**(6): 1 007-1 019.

[6] MORANCHO A B. A hedonic valuation of urban green areas [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2003, **66**(1): 35-41.

[7] HAN W, FANG J, GUO D, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, **168**(2): 377-385.

[8] 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.

[9] EHRENFELD J G. Effects of exotic plant invasions on soil nutrient cycling processes [J]. *Ecosystems*, 2003, **6**(6): 503-523.

[10] DAUFRESNE T, LOREAU M. Ecological stoichiometry, primary producer-decomposer interactions, and ecosystem persist-

ence[J]. *Ecology*, 2001, **82**(11): 3 069-3 082.

[11] ELSER J J, STERNER R W, GOROKHOVA E, *et al.* Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2000, **3**(6): 540-550.

[12] CARDINALE B, STABLER L B, ELSER J J. Ecological stoichiometry of N and P in pelagic ecosystems: comparison of lakes and oceans with emphasis on the zooplankton-phytoplankton interaction [J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**(4): 648-662.

[13] HAN W, FANG J, GUO D, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, **168**(2): 377-385.

[14] TILMAN D. Resource competition and communities structure [J]. *Monographs in Population Biology*, 1981, 17: 1-296.

[15] HE J S, WANG L, FLYNN D F B, *et al.* Leaf nitrogen; phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes [J]. *Oecologia*, 2008, **155**(2): 301-310.

[16] MANZONI S, JACKSON R B, TROFYMOW J A, *et al.* The global stoichiometry of litter nitrogen mineralization[J]. *Science*, 2008, **321**(5 889): 684-686.

[17] TIAN H, CHEN G, ZHENG C, *et al.* Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, **98**(1-3): 139-151.

[18] GUSEWELL S. N: P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, **164**(2): 243-266.

[19] KOERSLMAN 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): 1 441-1 450.