

DOI: 10.5846/stxb202003260704

高小敏,刘世荣,王一,栾军伟,蔡春菊,任立宁. 穿透雨减少和氮添加对毛竹叶片和细根化学计量学的影响. 生态学报, 2021, 41(4):1440-1450.  
Gao X M, Liu S R, Wang Y, Luan J W, Cai C J, Ren L N. Effects of throughfall reduction and nitrogen addition on stoichiometry of leaf and fine root in *Phyllostachys edulis* forests. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4):1440-1450.

## 穿透雨减少和氮添加对毛竹叶片和细根化学计量学的影响

高小敏<sup>1</sup>, 刘世荣<sup>2,\*</sup>, 王一<sup>1,3</sup>, 栾军伟<sup>1</sup>, 蔡春菊<sup>1,3</sup>, 任立宁<sup>4</sup>

1 国际竹藤中心, 竹藤科学与技术重点实验室, 北京 100102

2 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

3 四川长宁竹林生态系统国家定位监测研究站, 宜宾 644000

4 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091

**摘要:** 全球气候变化导致的干旱和人类活动引起的大气氮沉降升高, 将会直接影响森林生态系统的结构与功能。叶片和细根作为植物最重要的资源获取功能器官, 其化学计量学特征可指示其资源利用、生存适应策略。在当前气候变化背景下, 了解植物的化学计量特征和适应特征将有助于预测未来森林生态系统功能的变化。通过为期 1 年的双因素交互实验, 探讨了穿透雨减少和氮添加影响下, 我国亚热带重要森林类型毛竹林的叶片及细根碳(C)、氮(N)、磷(P)元素化学计量比的响应特征, 对于认识毛竹林生态系统对全球变化的适应和养分利用策略具有重要意义。研究表明: (1) 穿透雨减少处理显著降低叶片 N、P 含量, 显著增加细根 N 含量, 对叶片 C 含量和细根 C、P 含量无显著影响; 氮添加处理显著增加土壤 N 含量和叶片 N 含量, 对叶片 C、P 含量及细根 C、N、P 含量无显著影响。(2) 穿透雨减少、氮添加处理及两者交互作用对土壤 C:N:P 均无显著影响。(3) 穿透雨减少处理显著增加叶片 C:N、C:P 和 N:P; 氮添加处理显著降低叶片 C:N, 对叶片 C:P、N:P 无显著影响; 穿透雨减少、氮添加交互作用显著降低叶片 C:N 和 C:P, 对叶片 N:P 无显著影响。(4) 穿透雨减少处理显著降低细根 C:N, 对细根 C:P 及 N:P 无显著影响; 氮添加处理及穿透雨减少、氮添加交互作用对细根 C:N:P 无影响。综上短期处理的研究结果, 穿透雨减少处理产生的水分胁迫对毛竹产生了关键限制作用, 毛竹采取了降低叶片 N 和 P 含量、增加细根 N 含量, 提高叶片的 N 和 P 利用效率、保持细根稳定的 P 利用效率的策略。氮添加未能缓解穿透雨减少对毛竹产生的干旱胁迫, 毛竹通过改变地上部分叶片和地下部分细根之间的 N 素分配格局和 N、P 利用效率以应对水分胁迫。氮添加处理下叶片 N 含量显著增加, C:N 显著降低, 而细根 C、N、P 含量及化学计量比没有显著变化。由此可知毛竹地上部分叶片和地下部分细根对穿透雨减少、氮添加及两者交互作用表现出不同的响应策略。本研究可为全球变化背景下毛竹人工林可持续经营提供理论依据。

**关键词:** 穿透雨减少; 氮添加; 毛竹; 化学计量比; 适应策略

## Effects of throughfall reduction and nitrogen addition on stoichiometry of leaf and fine root in *Phyllostachys edulis* forests

GAO Xiaomin<sup>1</sup>, LIU Shirong<sup>2,\*</sup>, WANG Yi<sup>1,3</sup>, LUAN Junwei<sup>1</sup>, CAI Chunju<sup>1,3</sup>, REN Lining<sup>4</sup>

1 Key Laboratory of Bamboo and Rattan Science and Technology, International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China

2 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 Changning Bamboo Forest Ecosystem Research Station, Yibin 644000, China

4 Research Institute of Forest, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

**基金项目:** 国际竹藤中心基本科研业务费专项资金项目(1632017016, 1632018002, 1632019006, 1632018004); 十三五重点研发计划项目(2018YFD060010402)

**收稿日期:** 2020-03-26; **网络出版日期:** 2020-12-23

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liusr@caf.ac.cn

**Abstract:** The drought caused by global climate change and the increased atmospheric nitrogen deposition caused by human activities will directly affect the structure and function of forest ecosystems. Leaves and fine roots are the most important resource-obtaining functional organs of plants, whose stoichiometry characteristics can indicate their resource utilization and survival adaptation strategies. Under the background of climate change, understanding the stoichiometry and adaptive characteristics of plants will be beneficial to predict future changes in the forest's ecosystem functions. Through a two-factor interaction experiment for one year, this study explored the response characteristics of the stoichiometry ratio of carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) elements in leaves and fine roots of Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) forest (an important subtropical forest type in China) under the dual influences of throughfall reduction and nitrogen addition. It is of great significance for understanding the adaptation of Moso bamboo forest ecosystem to global changes and nutrient utilization strategies. The results showed that (1) the throughfall reduction significantly decreased N and P contents in leaves, but significantly increased N content in fine roots, and had no significant effect on C content in leaves as well as C and P contents in fine roots. Nitrogen addition significantly increased N content of soil and N content in leaves, but had no significant effect on C, P contents in leaves and C, N, P contents in fine roots. (2) The throughfall reduction, nitrogen addition and their interaction had no significant effect on the ratio of C:N:P of soil. (3) The throughfall reduction significantly increased the ratios of C:N, C:P, and N:P in leaves. Nitrogen addition significantly decreased the ratio of C:N in leaves, but had no significant effect on the ratios of C:P and N:P in leaves. The interaction of throughfall reduction and nitrogen addition significantly decreased the ratios of C:N and C:P in leaves, but had no significant effect on the ratio of N:P in leaves. (4) The throughfall reduction significantly decreased the ratio of C:N in fine roots, but had no significant effect on the ratios of C:P and N:P in fine roots. Nitrogen addition and the interaction of throughfall reduction and nitrogen addition had no effect on the ratio of C:N:P in fine roots. Our study indicated that Moso bamboo adopted strategies to reduce N and P contents in leaves, increase N content in fine roots, improve N and P utilization efficiency in leaves, and maintain fine roots' stable P utilization efficiency. Nitrogen addition failed to alleviate drought stress caused by the throughfall reduction on Moso bamboo. Moso bamboo coped with drought stress through changed N distribution pattern and N, P utilization efficiency between the aboveground (leaves) and the underground (fine roots). Under the treatment of nitrogen addition, N content in leaves increased significantly, and the ratio of C:N decreased significantly. However, C, N, and P contents in fine roots as well as the stoichiometric ratio did not change significantly. It can be seen that the aboveground (leaves) and the underground (fine roots) of Moso bamboo have different response strategies to the throughfall reduction, nitrogen addition and their interaction. This study can provide theoretical basis for the sustainable management of Moso bamboo plantation under the background of global change.

**Key Words:** throughfall reduction; nitrogen addition; *Phyllostachys edulis*; stoichiometry characteristics; adaptive strategy

生态化学计量学是研究多种化学元素对生态系统相互作用的一种理论<sup>[1]</sup>,能够反映植物的生存适应策略<sup>[2]</sup>,通常是指植物有机体的元素组成及相互关系,特别是碳(C)、氮(N)、磷(P)的含量及比值是化学计量学的主要研究内容<sup>[3-4]</sup>。C、N、P是生物地球化学循环过程中的重要元素,在调控生态系统结构和功能中具有重要的作用<sup>[5]</sup>。目前,全球变暖引起极端气候事件频发,IPCC预测未来全球大部分地区降雨减少<sup>[6]</sup>,我国干旱受灾区域将呈现北部地区向南部地区蔓延的趋势<sup>[7]</sup>。此外,化石燃料燃烧和氮肥施用导致大气氮沉降急剧增加<sup>[8-9]</sup>,大气氮沉降增加产生的生态效应逐渐成为国内外生态学家关注的热点<sup>[9-10]</sup>。Lehmann和Rillig<sup>[11]</sup>通过气候预测手段发现全球变化中多因子变化的共线性,越来越多的研究关注多个全球变化因子交互作用对生态系统的影响<sup>[9,12-13]</sup>。我国亚热带地区季节性降水格局引起的干旱和大气氮沉降量呈增加的趋势<sup>[14-15]</sup>。在未来干旱和氮沉降同时发生的情况下,研究干旱和氮沉降对该区毛竹林生态化学计量特征的影响对于深入了解全球变化下毛竹林生态系统的响应机制具有重要意义。

干旱导致土壤水分有效性显著降低,地上部分叶片和地下部分细根作为毛竹最重要的光合作用器官和养分与水分吸收器官<sup>[16]</sup>,植物会通过改变地上和地下部分的养分吸收、运输和分配来适应和响应胁迫环境,如干旱可能会使叶片 N、P 养分投入减少<sup>[17-19]</sup>,将资源更多地分配到细根<sup>[19-20]</sup>,以便吸收更多的水分和营养元素<sup>[17]</sup>。植物可能会通过增强叶片 N、P 利用效率以提高水分和养分在植物体内的运输和分配<sup>[20]</sup>,进而植物组织中的 C:N、C:P、N:P 也会发生相应的变化。氮沉降会改变土壤养分库<sup>[21]</sup>,提高土壤中养分 N 的含量<sup>[22]</sup>,土壤养分可直接影响植物对养分的吸收利用<sup>[23]</sup>,显著增加了植物叶片 N 含量<sup>[21,22-24]</sup>,导致叶片 C:N 的降低<sup>[25]</sup>。越来越多的研究开始关注氮沉降和干旱的交互作用,尤其是氮沉降对干旱环境下植物生长和生存的影响<sup>[17]</sup>。有研究表明,氮沉降缓解<sup>[9,26-27]</sup>、加剧<sup>[28]</sup>了干旱胁迫对植物的影响。也有研究表明由于受到水分的限制,氮沉降对植物的生态效应并不明显<sup>[29]</sup>。目前氮沉降对干旱胁迫下毛竹林生态系统的 C、N、P 含量及化学计量特征的生态效应尚不明确,因此还需进一步开展水、氮交互作用对毛竹林生态系统影响的相关研究。

毛竹(*Phyllostachys edulis*)林是我国亚热带地区极具代表性的人工林<sup>[10,24]</sup>,具有生长速度快、生物量积累大以及生产周期短等特点<sup>[30]</sup>,其经济效益与生态功能俱佳<sup>[31]</sup>。开展毛竹林相关生态化学计量学研究可以细化植物种群化学计量学内容,提供土壤营养诊断依据<sup>[32]</sup>。探究气候变化背景下毛竹林生态系统叶片-根系之间的 C、N、P 含量及其化学计量特征可以阐明毛竹林叶片和根系的养分分配、吸收、利用策略。为此,本试验依托四川长宁竹林生态系统国家定位观测研究站的“毛竹林生态系统氮、磷、水野外控制试验平台”,通过开展林内穿透雨减少和氮添加试验模拟干旱和氮沉降,研究水、氮及其交互作用下毛竹叶片-细根之间的 C、N、P 含量及化学计量比特征,揭示毛竹林生态系统的养分分配利用策略对环境变化的响应,以期为气候变化背景下毛竹林的可持续经营提供科学指导和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究地点位于四川省长宁县蜀南竹海景区内(105°00'59"—105°01'07"E,28°27'57"—28°28'07"N)。该地区属典型的中亚热带湿润性季风气候,温暖湿润,年均气温 18.3°C,年均降雨量 1114.7 mm<sup>[33]</sup>。地貌以中低山地和丘陵为主,土壤类型主要为山地黄壤和紫色土。植被覆盖率为 42%,主要竹种有毛竹、苦竹(*Pleioblastus amarus*)、慈竹(*Bambusa emeiensis*)和硬头黄竹(*Bambusa rigida*)等,林下植物有芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、狗脊(*Woodwardia japonica*)、里白(*Hicriopteris glauca*)等<sup>[34]</sup>。

### 1.2 试验设计与样地建设

本试验依托国际竹藤中心四川长宁竹林生态系统国家定位观测研究站 2017 年运行的氮、磷、水控制试验平台开展,采用林内穿透雨减少和氮添加双因素交互随机区组试验设计,共设置 4 区组(区组彼此相距 100 m 以上),每个区组内随机设置 4 种处理:穿透雨减少处理 Tr;林内穿透雨减少 50% + 0 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>、氮添加处理 Na;自然降水 + 100 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>、穿透雨减少 + 氮添加处理 Tr + Na;林内穿透雨减少 50% + 100 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>、对照处理 CK;自然降水 + 0 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,共 16 个试验样地,每个试验样地 20 m × 20 m。样地四周开挖壕沟,四周将 0.3 cm 厚的 PVC 软板埋入地下约 80 cm 深,以避免毛竹鞭根的生理整合作用和土壤水分横向运移。Na 和 Tr + Na 样地从 2017 年 6 月开始采用定期外源添加氮的方式(添加量:100 kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>):每两个月施加一次,每次将 1907 g 的硝酸铵溶于 100 L 水中再通过管道和自动喷洒装置均匀喷施于样地内;CK 样地和 Tr 样地用相同方式喷入等量的水。林内穿透雨减少样地设施布设参考国际减雨样地通用设计<sup>[35]</sup>,Tr 和 Tr + Na 样地建设如下<sup>[36]</sup>:在样地上方 2 m 处左右的位置搭建 PEP 透光膜的减雨棚,其材料透明可以保证很好的透光性(透光率 > 95%),减雨棚布设遮挡面积约为穿透雨减少样地总面积的 50%,并保持全年截持,拦截林内穿透雨。减雨棚两端的落差能够保证雨水顺利流入中间的导水槽,通过用导水槽将截留的降水导出样地以达到模拟雨量减少的效果。每个月定期收集减雨棚上凋落物并撤回至样地,以避免由于凋落物输入差异造成的试验误差。样地林分特征如表 1(2018 年调查)。

### 1.3 样品采集与测定

土壤环境因子监测: 在每块样地 10 cm 土壤深度安装土壤温湿度探头 (SM-150T, Delta-T Devices, USA), 土壤温湿度每 0.5 min 被读取一次, 每 30 min 的平均值被数据采集器 (DL2e, Delta-T Devices, USA) 记录<sup>[36]</sup>。

表 1 样地林分特征

Table 1 Stand characteristics of *Phyllostachys edulis*

样地 Sites	密度 Density/ (株/hm <sup>2</sup> )	平均胸径 Mean diameter at breast height/cm	坡度 Slope/(°)	海拔 Altitude/m	年龄结构 (I 度竹: II 度竹: III 度竹) Age structure (I: II: III degree bamboo)/ (%:%:%)
对照 Control (CK)	4725±350	9.61±0.10	<5	896.5±0.28	23:35:42
穿透雨减少 Throughfall reduction (Tr)	4600±550	9.63±0.10	<5	889.3±0.48	13:30:57
氮添加 Nitrogen addition (Na)	4825±350	9.31±0.13	<5	900.8±0.25	18:28:54
穿透雨减少+氮添加 Throughfall reduction+ Nitrogen addition (Tr+ Na)	4650±325	9.76±0.30	<5	895.5±0.65	14:32:54

18 年生(当年生)毛竹记为 I 度竹; 17—16 年生毛竹记为 II 度竹; 15—14 年生毛竹记为 III 度竹; 数据为平均值±标准差

土壤、植物样品采集: 2018 年 8 月在每个样地(均未进行挖笋工作)随机选取 3 个点, 小心剔除地面凋落物后采集 0—10 cm 土壤后均匀混合<sup>[36]</sup>, 土壤样品过 2 mm 筛后一部分用于硝态氮、铵态氮测定, 另一部分置于阴凉干燥处风干。风干土壤一部分用于 pH 的测定, 另一部分风干土壤研磨过 100 目筛用于土壤 C、N 和 P 含量的测定。土壤过 2 mm 筛的同时收集毛竹细根(直径<2 mm)样品, 用清水冲洗干净烘干至恒重后研磨过 100 目筛用于细根 C、N 和 P 含量的测定。与此同时, 在每个样地随机选取胸径接近样地平均胸径且长势良好的毛竹共 4 株, 用高枝剪采集每株毛竹中上部两个枝条, 将每样地获取的毛竹竹叶混合成一个样品, 叶片样品在 105℃ 下杀青半小时后转至 65℃ 下烘干至恒重, 研磨过 100 目筛用于叶片 C、N 和 P 含量的测定。

样品测定: 土壤样品经 2 mol/L 氯化钾溶液浸提后采用酚二磺酸比色法和靛酚蓝比色法通过化学分析仪 (Smartchem 300, AMS-Alliance, Italy) 测定土壤硝态氮、铵态氮含量<sup>[37]</sup>。土壤 pH 值使用 pH 计 (PHS-3C, INESA Inc., China) 采用玻璃电极法测定(水土比=2.5:1)<sup>[38]</sup>。植物、土壤全 C 和全 N 含量使用元素分析仪 (ECS 4010 CHNSO, Costech, Italy) 上机测定<sup>[36]</sup>, 植物、土壤全 P 含量通过硫酸-高氯酸法消煮, 采用钼锑抗比色法通过化学分析仪 (Smartchem 300, AMS-Alliance, Italy) 测定<sup>[33,39]</sup>。

### 1.4 数据处理与分析

试验数据在 Excel 2019 统计软件中进行整理。采用 SPSS 21.0 软件对数据进行统计分析, 采用双因素方差分析法分析穿透雨减少处理和氮添加处理及两者交互作用对土壤理化性质, 毛竹叶、细根及土壤 C、N、P 含量及化学计量比的影响, 采用 Pearson 法进行土壤和植物样品 C、N、P 含量的相关性分析。图表制作使用 GraphPad Prism 8 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 穿透雨减少处理和氮添加处理对土壤理化性质, C、N、P 含量及化学计量比的影响

由图 1 和图 2 可知, 穿透雨减少处理导致土壤含水量显著降低 34.9%, 但对其他土壤理化性质指标, C、N、P 含量及化学计量比无显著影响。氮添加处理导致土壤 N 含量显著增加 5.3%, 但对其他土壤理化性质指标, C、N、P 含量及化学计量比无显著影响。穿透雨减少和氮添加交互作用对土壤理化性质, C、N、P 含量及化学计量比均无显著影响。

### 2.2 穿透雨减少处理和氮添加处理对毛竹叶 C、N、P 含量及化学计量比的影响

由图 3 可知, 穿透雨减少处理对叶 C 含量无显著影响, 导致叶 N、P 含量显著降低 5.0% 和 12.8%, 但叶 C:N、C:P 和 N:P 分别显著增加了 4.8%, 25.1% 和 20.0%。氮添加处理导致叶 N 含量显著增加 5.6%, 叶 C:N

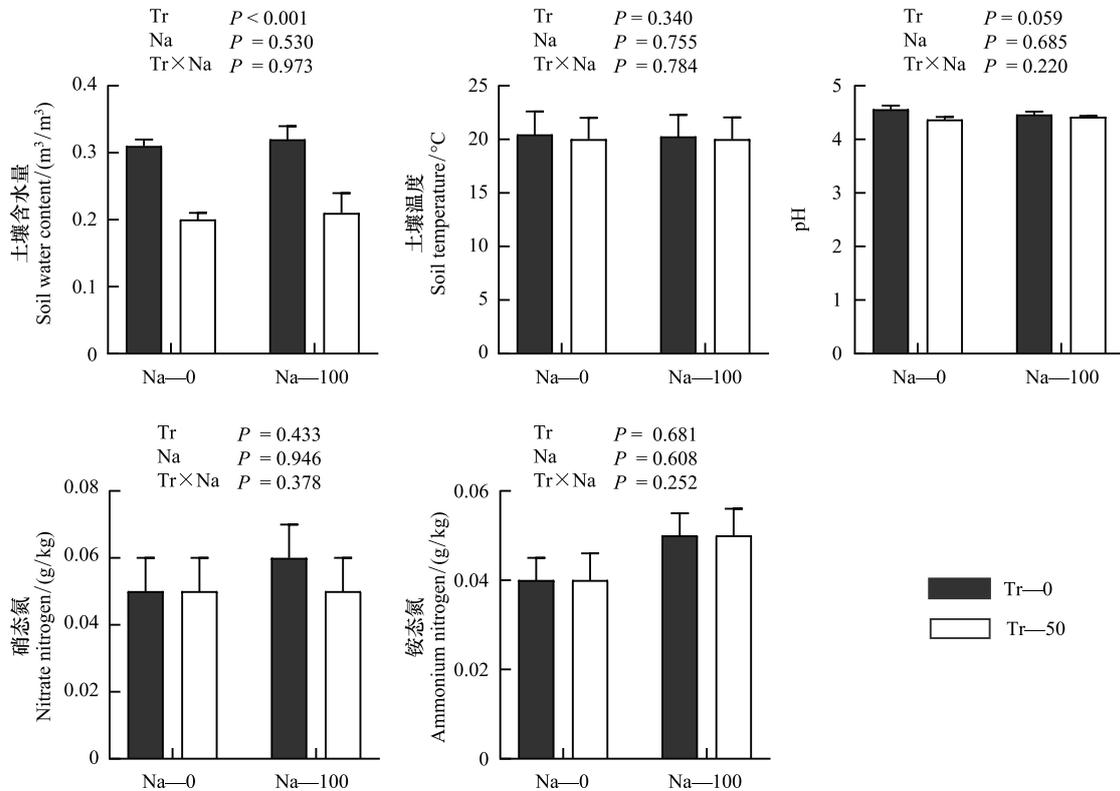


图1 穿透雨减少处理和氮添加处理对土壤理化性质的影响

Fig. 1 Effects of throughfall reduction and nitrogen addition on soil physical and chemical properties

Tr: 穿透雨减少处理, throughfall reduction treatment; Na: 氮添加处理, nitrogen addition treatment; Tr $\times$  Na: 穿透雨减少和氮添加交互作用, interaction between throughfall reduction and nitrogen addition; Tr=0: 自然降水, natural precipitation; Tr=50: 穿透雨减少 50%, throughfall reduction 50%; Na=0: 氮添加量为  $0 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,  $0 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$  nitrogen addition; Na=100: 氮添加量为  $100 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,  $100 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$  nitrogen addition

显著降低了 5.7%, 氮添加处理对叶 C 含量、P 含量、C:P、N:P 均无显著影响。穿透雨减少处理和氮添加处理交互作用对叶 C:N、C:P 具有显著影响, 具体表现为在穿透雨减少处理下, 氮添加使叶 C:N、C:P 显著降低 9.5%、23.4%, 但对叶 C、N、P 含量及 N:P 无显著影响。

### 2.3 穿透雨减少处理和氮添加处理对毛竹细根 C、N、P 含量及化学计量比的影响

由图 4 可知, 穿透雨减少处理导致细根 N 含量显著增加 16.0%, 细根 C:N 显著降低了 21.2%, 但对细根 C 含量、P 含量及 C:P、N:P 没有显著影响。氮添加处理及其与穿透雨减少处理的交互作用对毛竹细根 C、N、P 含量及 C:N:P 无显著影响。

### 2.4 毛竹叶、细根、土壤 C、N、P 含量的相关性对穿透雨减少处理和氮添加处理的响应

由表 2 可知, 各样地内土壤 C 含量与细根、叶片养分含量均无显著相关性。在 CK 样地内, 土壤 N 含量与叶片 C 含量显著负相关, 除此之外在各样地内土壤 N 含量与细根、叶片养分含量无显著相关性。在 CK、Na 和 Tr+ Na 样地中土壤 P 含量与细根 P 含量均显著正相关, 在 CK、Na 样地内土壤 P 含量与叶片 N 含量显著正相关, 除此之外在各样地内土壤 P 含量与细根、叶片养分含量无显著相关性。在 Tr 样地中, 叶片 N 含量与叶片 P 含量显著正相关, 在 Na 样地中, 叶片 N 含量与细根 P 含量显著正相关, 除此之外各样地内叶片与细根、叶片与叶片的 C、N、P 含量之间无显著相关性。

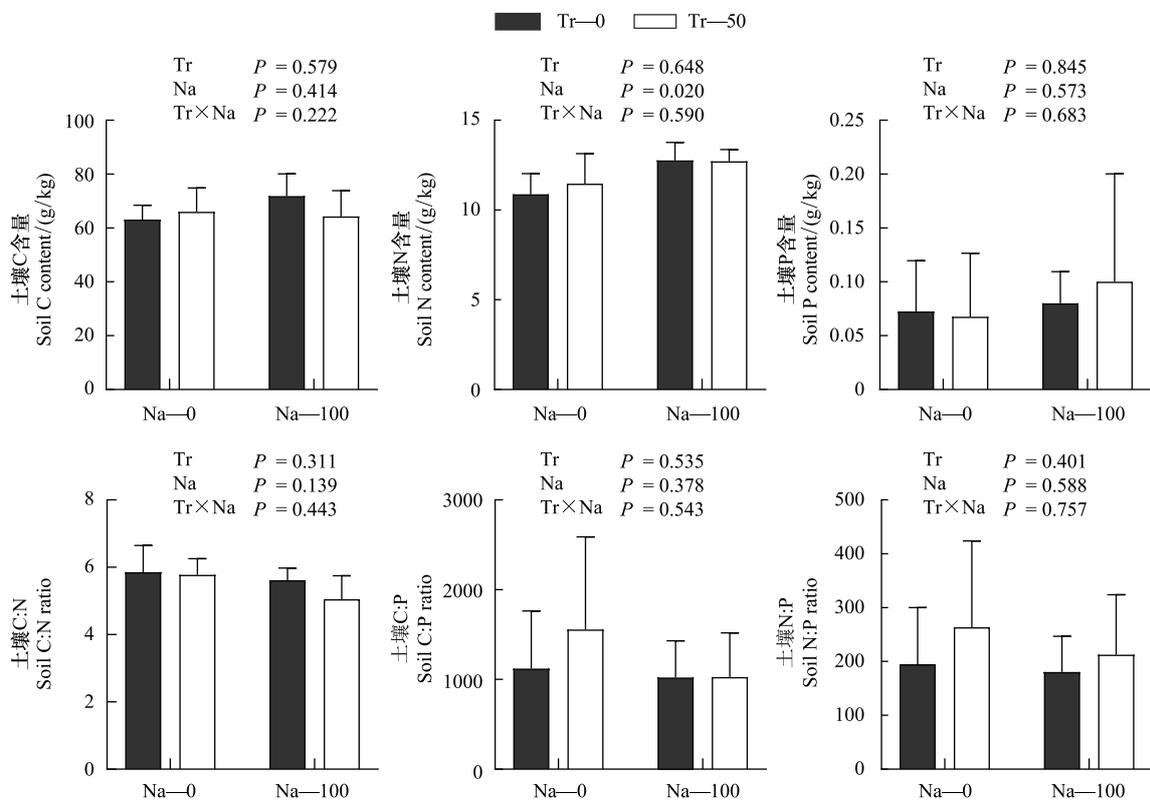


图2 穿透雨减少处理和氮添加处理对土壤 C、N、P 含量及化学计量比的影响

Fig. 2 Effects of throughfall reduction and nitrogen addition on soil carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) contents and stoichiometric characteristics

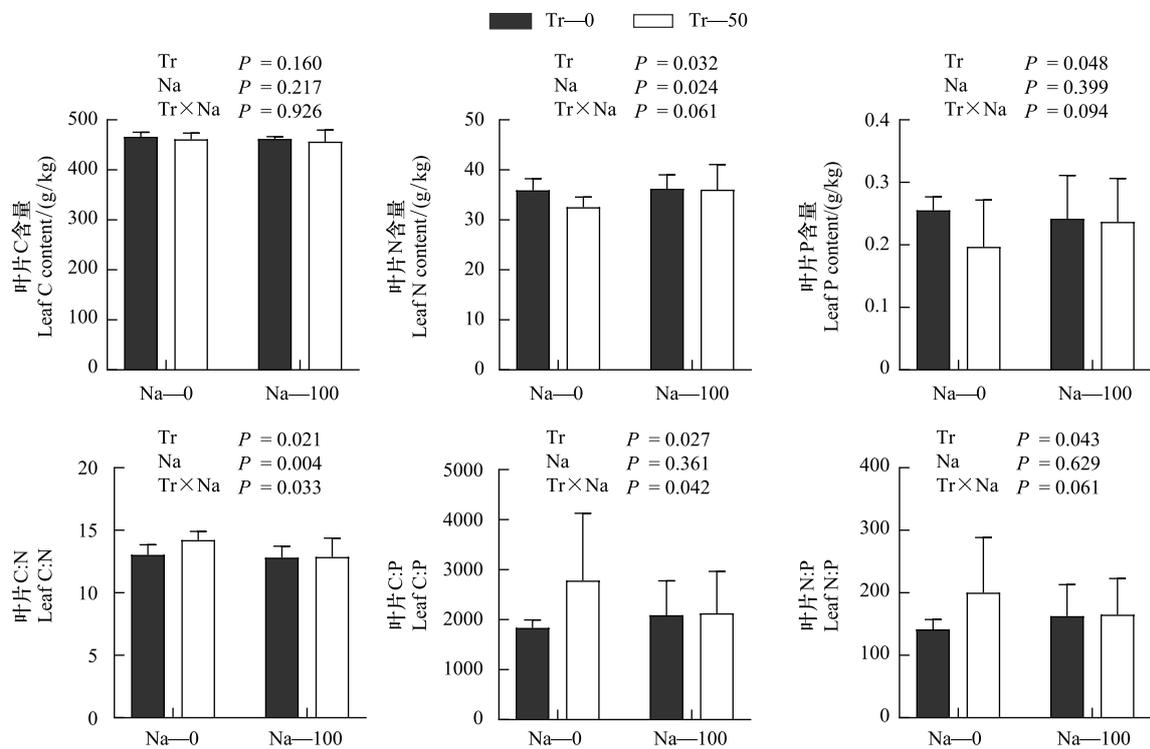


图3 穿透雨减少处理和氮添加处理对叶片 C、N、P 含量及化学计量比的影响

Fig. 3 Effects of throughfall reduction and nitrogen addition on leaf carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) contents and stoichiometric characteristics

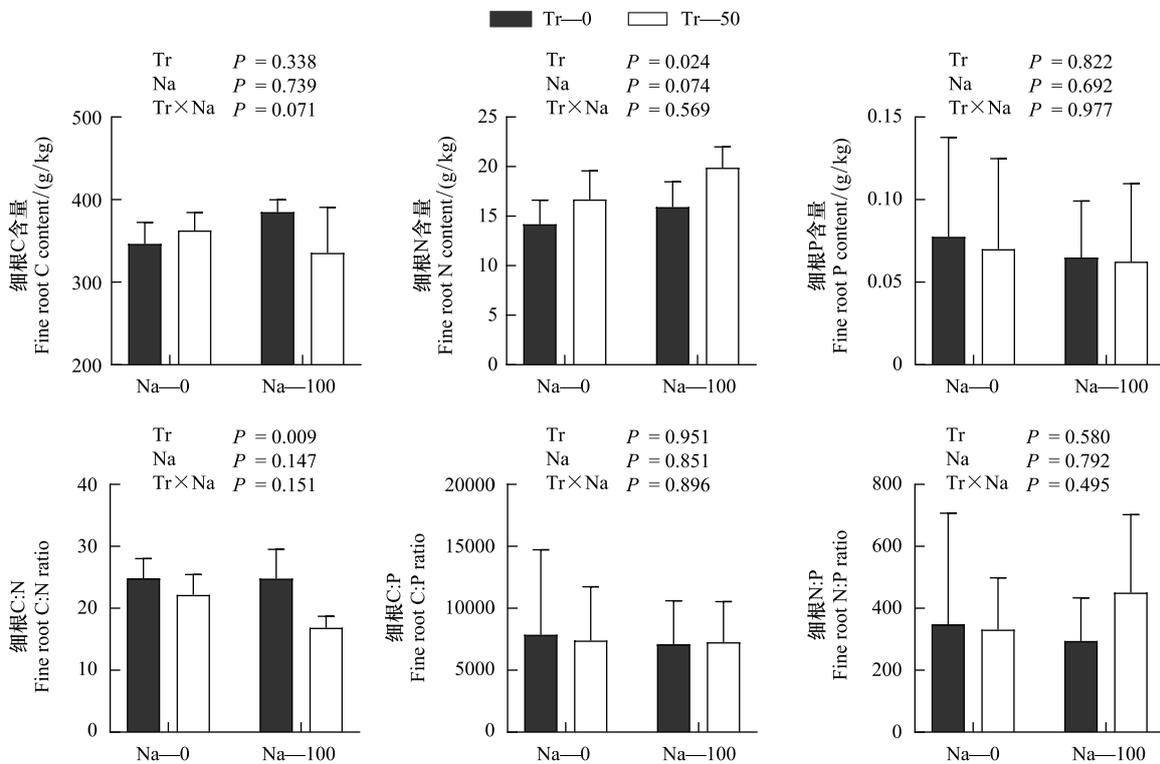


图4 穿透雨减少处理和氮添加处理对细根 C、N、P 含量及化学计量比的影响

Fig. 4 Effects of throughfall reduction and nitrogen addition on fine root carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) contents and stoichiometric characteristics

### 3 讨论

#### 3.1 穿透雨减少处理对毛竹叶、细根 C、N、P 含量及化学计量比的影响

植物体内养分含量体现了植物对环境的适应特征, C 作为结构性物质, 在植物体内主要起到骨架的作用, 其受环境影响较小从而含量相对稳定<sup>[40-41]</sup>; N、P 作为功能性物质, 在调控植物体内蛋白质、ATP 和 rRNA 等物质组成具有重要的作用<sup>[42-44]</sup>。本研究发现穿透雨减少处理显著改变了叶片 N、P 含量和细根 N 含量。这可能是因为相比于结构性物质, 功能性物质含量更容易受环境变化影响<sup>[42]</sup>。穿透雨减少处理显著降低了叶片 N 含量, 显著增加了细根 N 含量, 说明土壤水分有效性降低可以改变 N 在毛竹体内的分配格局。根系通过增加 N 含量对于干旱做出响应, 以保证根系生长对水分的吸收能力来维持植物体内正常的生理代谢活动<sup>[20]</sup>。因此, 穿透雨减少处理引起土壤水分有效性的降低改变了毛竹叶片-根系之间的 N 素分配格局。

C:N 和 C:P 通常能反映 N 和 P 的吸收和利用效率<sup>[45]</sup>。一般研究认为, 较高的 C:N、C:P 就具有较高的 N、P 利用效率<sup>[46]</sup>。本研究中穿透雨减少处理显著增加了叶片的 C:N 和 C:P, 这主要是由于穿透雨减少处理提高了叶片 N、P 利用效率以维持叶、根之间水分和养分的正常运输吸收<sup>[20]</sup>, 同时, 细根 C:P 没有发生显著变化, 这可能是因为毛竹在应对干旱胁迫时通过维持根系 P 含量不变以保证根系的渗透压, 进而维持根系水分吸收能力, 所以穿透雨减少处理下细根生长过程中有较为稳定的 P 利用效率。N:P 用来表征环境对植物生长的养分供应状况, 当植物叶片  $N:P > 16$  时, 生态系统受 P 限制; 当植物叶片  $14 < N:P < 16$ , 生态系统受 N 和 P 限制或者同时不受二者限制; 当植物叶片  $N:P < 14$  时, 生态系统受 N 限制<sup>[47-48]</sup>。本研究中毛竹叶 N:P 大于 16, 说明 P 是限制研究区毛竹生长的主要因素。且在穿透雨减少处理下叶片 N:P 显著增加, 穿透雨减少处理引起毛竹叶片 N、P 含量均显著降低, 但叶片 P 含量降低幅度大于 N 含量的降低幅度, 因此叶片 P 含量的降低

是导致毛竹叶片 N:P 显著增加的主要原因,说明气候干旱引起的土壤含水量下降会加剧 P 对于毛竹林生态系统的限制作用。因此,我们推测受 P 限制作用影响,该区域发生干旱可能会对毛竹林生态系统产生更深刻的影响。植物叶片较低的 N、P 养分含量有助于延长养分元素在植物体内的滞留时间,降低植物对土壤养分的依赖性,以增强植物在逆境中的适应性<sup>[49]</sup>。研究发现穿透雨减少处理并未改变土壤 C、N、P 含量及 C:N:P,说明穿透水减少的处理引起的土壤水分有效性降低并未改变土壤养分状态,土壤水分供应状况会影响植物根系对 N 的吸收<sup>[50]</sup>,而细根产生的适应性响应有助于对养分的吸收。因此,相比较于土壤养分含量变化,穿透雨减少处理引起土壤水分有效性降低将有可能成为调控毛竹生长和养分利用的限制因素<sup>[51]</sup>。对对照地中土壤 P 含量与细根 P 含量显著正相关(相关系数=0.979),而穿透雨减少样地中土壤 P 含量与细根 P 含量之间无相关性(相关系数=0.836),说明土壤水分有效性降低会导致毛竹对 P 的吸收利用与土壤磷元素含量呈现解耦合,验证了黄菊莹等人<sup>[51]</sup>的研究发现。穿透雨减少样地中叶片 N 含量和 P 含量呈显著正相关关系(相关系数=0.980),而对对照地中叶片的 N 含量和 P 含量并未见显著相关关系说明干旱对叶片 N、P 养分元素具有协同调控作用。

表 2 毛竹叶片-土壤-细根之间 C、N、P 含量的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of C, N, P contents between leaf, fine root and soil of *Phyllostachys edulis*

样地 Sites	指标 Indices		细根 Fine root			叶 Leaf		
			C	N	P	C	N	P
对照 Control (CK)	土壤	C	0.876	0.833	0.197	0.186	0.507	-0.099
		N	0.198	-0.079	-0.578	-0.990**	-0.297	-0.947
		P	0.495	-0.195	0.979*	0.561	0.971*	0.578
	叶	C	-0.079	0.083	0.674	1	0.427	0.950
		N	0.689	-0.037	0.902	—	1	0.393
		P	-0.272	-0.231	0.722	—	—	1
穿透雨减少 Throughfall reduction (Tr)	土壤	C	0.741	0.364	0.779	0.912	0.887	0.827
		N	0.423	-0.147	0.944	0.522	0.604	0.449
		P	0.367	-0.427	0.836	0.312	0.345	0.176
	叶	C	0.814	0.660	0.490	1	0.903	0.925
		N	0.502	0.699	0.700	—	1	0.980*
		P	0.534	0.815	0.546	—	—	1
氮添加 Nitrogen addition (Na)	土壤	C	0.359	0.095	-0.171	-0.346	0.020	0.207
		N	-0.112	0.545	-0.246	-0.060	-0.178	0.319
		P	0.359	-0.403	0.998**	0.734	0.955*	0.844
	叶	C	-0.369	0.268	0.717	1	0.501	0.812
		N	0.619	-0.616	0.958*	—	1	0.738
		P	0.068	0.070	0.809	—	—	1
穿透雨减少+氮添加 Throughfall reduction + Nitrogen addition (Tr+Na)	土壤	C	0.636	0.590	0.912	-0.093	0.766	0.526
		N	-0.323	-0.571	0.346	0.715	0.637	0.359
		P	0.575	0.380	0.954*	0.177	0.905	0.679
	叶	C	-0.172	-0.737	0.206	1	0.554	0.613
		N	0.521	0.080	0.922	—	1	0.893
		P	0.665	0.083	0.827	—	—	1

\* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$ 

### 3.2 氮添加处理对毛竹叶、细根 C、N、P 含量及化学计量比的影响

本研究中氮添加处理显著增加叶片 N 含量,这可能是土壤 N 供应充足时,当前模拟氮沉降的强度在短期内有利于毛竹叶片对 N 的吸收<sup>[10,15]</sup>,毛竹叶片可以存储超过其生长中养分的需求量,以供应来年出笋、发竹时对母竹 N 元素大量且快速的需求<sup>[52]</sup>。氮添加样地中毛竹叶片 N 含量与土壤 P 含量密切相关(相关系数 =

0.955), 本研究中氮添加处理显著增加叶片 N 含量并未改变土壤中 P 含量, 说明氮添加可能会增加土壤 P 的供给压力。这与 Gress 等<sup>[53]</sup>关于氮添加会造成土壤 P 供应不足, 进一步造成甚至是加剧 P 限制的研究结果相似。与氮添加处理对叶片 N 含量的影响不同, 我们并未发现氮添加处理显著改变叶片的 P 含量, 这可能是由于氮添加引起土壤中铝离子增加抑制了植物对 P 的吸收<sup>[54]</sup>。有研究发现, 如果植物体内的某种元素与土壤中该元素的供应能力成正比, 说明该植物的生长受到此元素的限制<sup>[55]</sup>。从本研究相关性分析可知, 在进行氮添加的处理中细根 P 含量与土壤 P 含量显著正相关(相关系数=0.998 和 0.954), 这进一步说明毛竹生长受土壤 P 元素的限制, 这与陈晓萍<sup>[56]</sup>, Wardle<sup>[57]</sup>等关于亚热带森林生态系统植被生长主要受土壤 P 限制的结果基本一致。氮添加显著降低了毛竹叶片 C:N, 可能是由于氮添加导致叶片 N 吸收超过毛竹生长对 N 需求, N 的利用效率降低, 所以叶片 C:N 显著降低, 这与万雪冰等人<sup>[58]</sup>关于外源 N 输入对白桦鲜叶 C:N 的影响研究情况相似。叶片和细根化学计量特征对于环境变化的响应敏感程度不同。通常认为植物地下部分化学计量比对于环境变化的响应不如地上部分敏感<sup>[59]</sup>, 这可能与叶片作为光合生长器官的代谢活跃有关<sup>[60]</sup>。本研究中氮添加显著增加叶片 N 含量, 降低叶片 C:N, 而细根 C、N、P 含量及化学计量特征均没有显著变化, 说明氮添加下毛竹叶片对养分的获取能力可能更强。

### 3.3 穿透雨减少处理和氮添加处理交互作用对叶、细根 C、N、P 含量及化学计量比的影响

有研究表明, 在干旱环境中, 水分是影响植物整体水平的主要因子, 其次是氮素<sup>[29]</sup>。本研究得出相似的结论, 无论氮添加与否, 毛竹叶片 C:N 和 C:P 均表现为: 穿透雨减少处理高于或者显著高于对照的处理, 且在穿透雨减少处理中氮添加使得毛竹叶片 C:N、C:P 均呈显著下降的趋势, 即毛竹叶片每单位 N、P 养分进行碳同化能力减弱, N、P 利用效率降低。由此可以说明穿透雨减少、氮添加共同作用后, 水分影响始终占据主导地位<sup>[27]</sup>, 且穿透雨减少、氮添加对毛竹叶 N、P 养分利用效率具有一定的交互作用。这可能归因于植物为最大化获取和分配有限的养分和水分等生长限制性资源, 而调整其养分利用策略<sup>[61]</sup>。另一方面, 植物会做出权衡选择, 是将养分更多地分配给地上部分叶片以便于维持光合作用, 还是更多地分配给地下部分细根籍以促进水分、养分的吸收。Broadley 等人<sup>[62]</sup>研究表明, 为了最大限度固定 C, 植物通常将养分更多分配给地上部分叶片以保证其正常生长, 但也有研究表明水分胁迫下氮添加会有利于地下部分养分的投入<sup>[63]</sup>。本研究结果与其相似, 在穿透雨减少处理下氮添加对毛竹叶片、细根养分含量影响虽不显著, 但叶片 N、P 含量, 细根 N 含量均呈增加趋势, 且细根 N 含量及 C:N 的变化幅度大于叶片。所以, 毛竹可能将 N 更多投入地下根系(特别是细根养分增加以便吸收更多或更深层的土壤水分)以应对干旱胁迫环境<sup>[20]</sup>, 而伴随毛竹叶片 N 利用效率降低。

## 4 结论

穿透雨减少处理产生的水分胁迫显著降低了毛竹叶片 N、P 含量, 但是叶片的 C:N、C:P 和 N:P 显著增加; 穿透雨减少处理显著增加了细根 N 含量, 细根 C:N 显著降低。氮添加未呈现缓解穿透雨减少处理对毛竹产生的干旱胁迫影响, 毛竹通过改变地上、地下部分 N 素分配格局和 N、P 利用效率的适应策略响应干旱胁迫环境。氮添加显著增加了叶片 N 含量和土壤 N 含量, 叶片 C:N 显著降低, 地下部分细根 C、N、P 含量及化学计量比没有显著变化, 可能说明氮添加下毛竹叶片有更强的养分获取能力。本研究得到的结论是短期控制试验的结果, 尚需要继续开展长期观测研究, 籍以准确预测未来气候变化背景下多种环境胁迫因子对毛竹林生态系统的影响。

### 参考文献 (References):

- [1] 许雪贇, 曹建军, 杨淋, 杨书荣, 龚毅帆, 李梦天. 放牧与围封对青藏高原草地土壤和植物叶片化学计量学特征的影响. 生态学杂志, 2018, 37(5): 1349-1355.
- [2] Yan W M, Zhong Y Q W, Zheng S X, Shangguan Z P. Linking plant leaf nutrients/stoichiometry to water use efficiency on the Loess Plateau in China. Ecological Engineering, 2016, 87: 124-131.

- [ 3 ] Elser J J, Dobberfuhl D R, MacKay N A, Schampel J H. Organism size, life history, and N:P stoichiometry: toward a unified view of cellular and ecosystem processes. *Bioscience*, 1996, 46(9): 674-684.
- [ 4 ] 王晶苑, 张心昱, 温学发, 王绍强, 王辉民. 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制. *生态学报*, 2013, 33(5): 1337-1346.
- [ 5 ] Westheimer F H. Why nature chose phosphates. *Science*, 1987, 235(4793): 1173-1178.
- [ 6 ] Landman W. Climate change 2007: the physical science basis. *South African Geographical Journal*, 2010, 92(1): 86-87.
- [ 7 ] 杨振亚, 周本智, 陈庆标, 葛晓改, 王小明, 曹永慧, 童冉, 石洋. 干旱对杉木幼苗根系构型及非结构性碳水化合物化合物的影响. *生态学报*, 2018, 38(18): 6729-6740.
- [ 8 ] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, Bekunda M, Cai Z C, Freney J R, Martinelli L A, Seitzinger S P, Sutton M A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [ 9 ] 孙彩丽, 肖列, 李鹏, 薛莲, 刘国彬. 氮素添加和干旱胁迫下白羊草碳氮磷化学计量特征. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 1120-1127.
- [ 10 ] 安卓, 牛得草, 文海燕, 杨益, 张洪荣, 傅华. 氮素添加对黄土高原典型草原长芒草氮磷重吸收率及 C:N:P 化学计量特征的影响. *植物生态学报*, 2011, 35(8): 801-807.
- [ 11 ] Lehmann J, Rillig M. Distinguishing variability from uncertainty. *Nature Climate Change*, 2014, 4(3): 153.
- [ 12 ] Lü X T, Kong D L, Pan Q M, Simmons M E, Han X G. Nitrogen and water availability interact to affect leaf stoichiometry in a semi-arid grassland. *Oecologia*, 2012, 168(2): 301-310.
- [ 13 ] Gargallo-Garriga A, Sardans J, Pérez-Trujillo M, Oravec M, Urban O, Jentsch A, Kreyling J, Beierkuhnlein C, Parella T, Peñuelas J. Warming differentially influences the effects of drought on stoichiometry and metabolomics in shoots and roots. *New Phytologist*, 2015, 207(3): 591-603.
- [ 14 ] 隋月, 黄晚华, 杨晓光, 李茂松. 气候变化背景下中国南方地区季节性干旱特征与适应 I. 降水资源演变特征. *应用生态学报*, 2012, 23(7): 1875-1882.
- [ 15 ] 翁俊, 顾鸿昊, 王志坤, 赵明水, 宋新章. 氮沉降对毛竹叶片生态化学计量特征的影响. *生态科学*, 2015, 34(2): 63-70.
- [ 16 ] 丁小慧, 宫立, 王东波, 伍星, 刘国华. 放牧对呼伦贝尔草地植物和土壤生态化学计量学特征的影响. *生态学报*, 2012, 32(15): 4722-4730.
- [ 17 ] He M Z, Dijkstra F A. Drought effect on plant nitrogen and phosphorus: a meta-analysis. *New Phytologist*, 2014, 204(4): 924-931.
- [ 18 ] Waraich E A, Ahmad R, Saifullah, Ashraf M Y, Ehsanullah. Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. *Australian Journal of Crop Science*, 2011, 5(6): 764-777.
- [ 19 ] Sardans J, Peñuelas J. The role of plants in the effects of global change on nutrient availability and stoichiometry in the plant-soil system. *Plant Physiology*, 2012, 160(4): 1741-1761.
- [ 20 ] 王凯, 雷虹, 王宗琰, 吕林有, 宋立宁. 干旱胁迫下小叶锦鸡儿幼苗 C、N、P 分配规律及化学计量特征. *林业科学研究*, 2019, 32(4): 47-56.
- [ 21 ] Sardans J, Rivas-Ubach A, Peñuelas J. The C:N:P stoichiometry of organisms and ecosystems in a changing world: a review and perspectives. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2012, 14(1): 33-47.
- [ 22 ] Yang D X, Song L, Jin G Z. The soil C:N:P stoichiometry is more sensitive than the leaf C:N:P stoichiometry to nitrogen addition: a four-year nitrogen addition experiment in a *Pinus koraiensis* plantation. *Plant and Soil*, 2019, 442(1): 183-198.
- [ 23 ] 王巧, 张君波, 雷赵枫, 刘宁, 李全, 黄华宏, 宋新章. 模拟氮沉降和磷添加对杉木生态化学计量学特征的影响. *生态学杂志*, 2019, 38(2): 368-375.
- [ 24 ] Song X Z, Gu H H, Wang M, Zhou G M, Li Q. Management practices regulate the response of Moso bamboo foliar stoichiometry to nitrogen deposition. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24107.
- [ 25 ] 刘红梅, 李洁, 王丽丽, 赵建宁, 王慧, 杨殿林. 氮添加对贝加尔针茅草原植物和土壤化学计量特征的影响. *草业学报*, 2018, 27(7): 25-35.
- [ 26 ] 周晓兵, 张元明, 王莎莎, 张丙昌. 模拟氮沉降和干旱对准噶尔盆地两种一年生荒漠植物生长和光合生理的影响. *植物生态学报*, 2010, 34(12): 1394-1403.
- [ 27 ] 段娜, 李清河, 陈晓娜, 高君亮, 多普增, 张冉昊, 汪季. 模拟干旱和氮沉降对唐古特白刺根系生长特征的影响. *草地学报*, 2019, 27(4): 956-961.
- [ 28 ] 邵珊瑚. 氮沉降和干旱胁迫对毛竹实生苗生长及氮代谢的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
- [ 29 ] Lajtha K, Schlesinger W H. Plant response to variations in nitrogen availability in a desert shrubland community. *Biogeochemistry*, 1986, 2(1): 29-37.
- [ 30 ] 周国模. 毛竹林生态系统中碳储量、固定及其分配与分布的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [ 31 ] 杜满义, 范少辉, 刘广路, 封焕英, 郭宝华, 唐晓鹿. 中国毛竹林碳氮磷生态化学计量特征. *植物生态学报*, 2016, 40(8): 760-774.
- [ 32 ] 顾大彤, 陈双林, 黄玉清. 土壤氮磷对四季竹叶片氮磷化学计量特征和叶绿素含量的影响. *植物生态学报*, 2011, 35(12): 1219-1225.
- [ 33 ] 任立宁, 刘世荣, 蔡春菊, 王一, 吴溪毗, 郭明明. 川南地区毛竹和林下植被芒箕细根分解特征. *生态学报*, 2018, 38(21): 7638-7646.
- [ 34 ] 任立宁, 刘世荣, 王一, 蔡春菊, 栾军伟, 陈琛. 毛竹和林下植被芒箕凋落物分解特征研究. *林业科学研究*, 2018, 31(5): 91-97.
- [ 35 ] Beier C, Beierkuhnlein C, Wohlgemuth T, Penuelas J, Emmett B, Körner C, de Boeck H, Christensen J H, Leuzinger S, Janssens I A, Hansen

- K. Precipitation manipulation experiments—challenges and recommendations for the future. *Ecology Letters*, 2012, 15(8): 899-911.
- [36] Wu X P, Liu S R, Luan J W, Wang Y, Cai C J. Responses of water use in Moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) culms of different developmental stages to manipulative drought. *Forest Ecosystems*, 2019, 6(1): 1-14.
- [37] 张敏, 邹晓明. 热带季节雨林与人工橡胶林土壤碳氮比较. *应用生态学报*, 2009, 20(5): 1013-1019.
- [38] 刘昀, 熊礼燕, 廖观荣, 林励. 土壤酸度对化橘红柚皮苷含量的影响. *广州中医药大学学报*, 2012, 29(6): 707-709, 715-715.
- [39] 陈安娜, 王光军, 陈婵, 李淑英, 李维佳. 亚热带不同林龄杉木林叶-根-土氮磷化学计量特征. *生态学报*, 2018, 38(11): 4027-4036.
- [40] 宾振钧, 王静静, 张文鹏, 徐当会, 程雪寒, 李柯杰, 曹德昊. 氮肥添加对青藏高原高寒草甸 6 个群落优势种生态化学计量学特征的影响. *植物生态学报*, 2014, 38(3): 231-237.
- [41] 郭子武, 陈双林, 杨清平, 李迎春. 雷竹林土壤和叶片 N/P 化学计量特征对林地覆盖的响应. *生态学报*, 2012, 32(20): 6361-6368.
- [42] 郑婧, 余维维, 白宇轩, 张宇清, 秦树高, 吴斌. 氮素和水分添加对毛乌素沙地油蒿群落优势植物叶片性状的影响. *林业科学*, 2018, 54(10): 164-171.
- [43] 常宏, 杨洪国, 赵广东, 史作民, 王兵, 陈健, 罗嘉东, 陈和东. 施氮和减水对中亚热带壳斗科三种幼树生物量及其分配的影响. *生态学报*, 2019, 39(18): 6753-6761.
- [44] 李单凤, 于顺利, 王国勋, 方伟伟. 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. *植物生态学报*, 2015, 39(5): 453-465.
- [45] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. *植物生态学报*, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [46] 宁志英, 李玉霖, 杨红玲, 孙殿超, 毕京东. 科尔沁沙地主要植物细根和叶片碳、氮、磷化学计量特征. *植物生态学报*, 2017, 41(10): 1069-1080.
- [47] Güsewell S. N: P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243-266.
- [48] 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.
- [49] 李家湘, 徐文婷, 熊高明, 王杨, 赵常明, 卢志军, 李跃林, 谢宗强. 中国南方灌丛从优势木本植物叶的氮、磷含量及其影响因素. *植物生态学报*, 2017, 41(1): 31-42.
- [50] 于贵瑞, 高扬, 王秋风, 刘世荣, 申卫军. 陆地生态系统碳-氮-水循环的关键耦合过程及其生物调控机制探讨. *中国生态农业学报*, 2013, 21(1): 1-13.
- [51] 黄菊莹, 余海龙, 刘吉利, 马飞, 韩磊. 控雨对荒漠草原植物、微生物和土壤 C、N、P 化学计量特征的影响. *生态学报*, 2018, 38(15): 5362-5373.
- [52] 张献义, 陈金林, 叶长青, 梁文焰, 张碧松, 李启鹏. 毛竹林养分动态与产量关系的研究. *林业科学研究*, 1995, 8(5): 477-482.
- [53] Gress S E, Nichols T D, Northercraft C C, Peterjohn W T. Nutrient limitation in soils exhibiting differing nitrogen availabilities: what lies beyond nitrogen saturation? *Ecology*, 2007, 88(1): 119-130.
- [54] 李德军, 莫江明, 彭少麟, 方运霆. 南亚热带森林两种优势树种幼苗的元素含量对模拟氮沉降增加的响应. *生态学报*, 2005, 25(9): 2165-2172.
- [55] 赵一娉, 曹扬, 陈云明, 彭守璋. 黄土丘陵沟壑区森林生态系统生态化学计量特征. *生态学报*, 2017, 37(16): 5451-5460.
- [56] 陈晓萍, 郭炳桥, 钟全林, 王满堂, 李曼, 杨福春, 程栋梁. 武夷山不同海拔黄山松细根碳、氮、磷化学计量特征对土壤养分的适应. *生态学报*, 2018, 38(1): 273-281.
- [57] Wardle D A, Walker L R, Bardgett R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences. *Science*, 2004, 305(5683): 509-513.
- [58] 万雪冰, 王庆贵, 闫国永, 邢亚娟. 天然次生林植物叶片生态化学计量特征及光合特性对长期 N 沉降的响应. *植物研究*, 2019, 39(3): 407-420.
- [59] 康扬眉, 马凯博, 黄菊莹, 杜雅仙, 余海龙. 氮磷供给对荒漠草原土壤和白草 C:N:P 化学计量特征的影响. *西北植物学报*, 2018, 38(8): 1507-1516.
- [60] 刘超, 王洋, 王楠, 王根轩. 陆地生态系统植被氮磷化学计量研究进展. *植物生态学报*, 2012, 36(11): 1205-1216.
- [61] Monclus R, Dreyer E, Villar M, Delmotte F M, Delay D, Petit J M, Barbaroux C, Le Thiec D, Bréchet C, Brignolas F. Impact of drought on productivity and water use efficiency in 29 genotypes of *Populus deltoides* × *Populus nigra*. *New Phytologist*, 2006, 169(4): 765-777.
- [62] Broadley M R, Escobar-Gutiérrez A J, Burns A E, Burns I G. What are the effects of nitrogen deficiency on growth components of lettuce? *New Phytologist*, 2000, 147(3): 519-526.
- [63] 梁银丽, 陈培元. 水分胁迫和氮素营养对小麦根苗生长及水分利用效率的效应. *西北植物学报*, 1995, 15(1): 21-25.