

模拟酸雨对红壤区茶树器官氮磷含量及其化学计量比的影响

张宇飞¹ 方向民^{1*} 陈伏生¹ 宗莹莹¹ 顾菡娇¹ 胡小飞²

(¹江西农业大学林学院江西特色林木资源培育与利用 2011 协同创新中心, 南昌 330045; ²南昌大学管理学院, 南昌 330031)

摘要 以红壤区 25 年生茶园为对象, 开展 pH 4.5、pH 3.5、pH 2.5 及自来水(对照)4 种强度模拟酸雨处理原位试验, 于处理第 3 年收集茶树体不同功能根系和不同年龄枝、叶, 测定氮(N)、磷(P)含量, 并计算化学计量比和酸雨响应敏感度. 结果表明: 土壤 pH 值、硝态 N 和有效 P 随酸雨强度增加而显著降低. 吸收根 N 含量随酸雨强度增加而提高, pH 2.5 处理下吸收根 N 含量与对照相比显著提高 32.9%; 储藏根 P 含量随酸雨强度增强而显著降低; 同时酸雨处理显著提高吸收根 N/P. 新叶和老叶 N、P 含量对不同强度酸雨处理响应不敏感, 但酸雨处理增加了老叶 N/P, 且在 pH 3.5 处理下达到显著水平. 酸雨处理对枝条的影响与其年龄有关, 新枝 N 含量和 N/P 在低强度酸雨(pH 4.5)处理下显著增加, 而老枝 N 含量和 N/P 对酸雨处理响应不敏感. 吸收根、新叶和新枝 N 含量对酸雨响应敏感度分别高于储藏根、老叶和老枝, 而储藏根和叶片 P 含量对酸雨响应敏感度高于其他器官. 茶树器官 N 含量对酸雨处理较为敏感, 适度酸雨可增加幼嫩器官 N 含量和 N/P, 改变茶树体 N、P 的循环和平衡.

关键词 酸雨; 氮; 磷; 茶树; 组织分异

Influence of simulated acid rain on nitrogen and phosphorus contents and their stoichiometric ratios of tea organs in a red soil region, China. ZHANG Yu-fei¹, FANG Xiang-min^{1*}, CHEN Fu-sheng¹, ZONG Ying-ying¹, GU Han-jiao¹, HU Xiao-fei² (¹2011 Collaborative Innovation Center of Jiangxi Typical Trees Cultivation and Utilization, College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; ²School of Management, Nanchang University, Nanchang 330031, China).

Abstract: A 25-year-old tea plantation in a typical red soil region was selected for an *in situ* simulated acid rain experiment treated by pH 4.5, 3.5, 2.5 and water (control, CK). Roots with different functions, leaves and twigs with different ages were collected to measure nitrogen (N) and phosphorus (P) contents in the third year after simulated acid rain treatment. The N/P and acid rain sensitivity coefficient of tea plant organs were also calculated. The results indicated that with the increase of acid rain intensity, the soil pH, NO₃⁻-N and available P decreased, while the absorption root N content increased. Compared with the control, the N content in absorption root was increased by 32.9% under the treatment of pH 2.5. The P content in storage root significantly decreased with enhanced acid rain intensity, and the acid rain treatment significantly enhanced N/P of absorption root. Young and mature leaf N, P contents were not sensitive to different intensities of acid rain, but the mature leaf N/P was significantly increased under pH 3.5 treatment compared with the control. The effects of acid rain treatments differed with tea twig ages. Compared with the control, low intensity acid treatment (pH 4.5) significantly increased young twig N content and N/P, while no significant differences in old twig N content and N/P were observed among four acid rain treatments. Acid rain sensitivity coefficients of absorption root, young leaf and twig N contents were higher than that of storage root, old leaf and twig, respectively. And the storage root and leaf P had higher acid rain sensitivity coefficient than other tea organs. In sum, tea organs N content was

本文由国家自然科学基金项目(31560152, 31260199)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31560152, 31260199).

2016-08-07 Received, 2017-01-15 Accepted.

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: xmfang2013@126.com

sensitive to acid rain treatment, and moderate acid rain could increase young organ N content and N/P, and change the cycle and balance of N and P in tea plantation.

Key words: acid rain; nitrogen; phosphorus; *Camellia sinensis*; tissue differentiation.

酸雨是全球最严重的环境问题之一,我国是酸雨多发区,许多生态系统均受到酸雨的严重危害^[1-2].随着我国酸雨覆盖面积和强度的增加,酸雨对植物养分及元素生物地球化学循环、植物生产力的影响等受到广泛关注^[2-4].酸雨不仅可以直接作用于植物的生理生化过程,改变植物养分需求,还可以通过一系列的物理、化学和生物过程引起土壤酸化,改变土壤养分转化和供应,影响植物养分吸收^[5-6].然而,植物不同年龄或功能的器官,如新鲜叶和成熟叶、不同根序的根系,其养分周转速率及对外界环境变化响应的敏感性不同^[7].因此,酸雨对植物器官的影响可能与其年龄和功能有关.目前,酸雨对植物器官影响已开展很多研究^[8-9],但关于不同酸雨强度对植物体不同年龄和功能器官影响的研究较少,限制了对酸雨胁迫生态效应的全面理解.

氮(N)和磷(P)是影响植物生长发育最重要的两大元素,其含量及其生态化学计量特征与植物代谢状况关系密切,可用于评价植物对外界环境干扰的响应程度^[10-11].酸雨导致的土壤酸化可显著改变土壤养分供应和酶活性,如降低土壤矿质 N、速效 P 及 N 净矿化速率和 P 矿化速率等^[12-14],这势必影响植物的 N、P 养分吸收及其化学计量特征^[9,15],而目前植物体器官 N、P 含量及其化学计量特征对酸雨胁迫的响应特征研究较为缺乏.此外,酸雨对植物体 N、P 周转和平衡的影响可能存在累加效应^[13-16],而多数研究主要关注酸雨对生态系统影响的短期效应,难以回答长期(如 1 年以上)酸雨胁迫及不同酸雨强度影响下生态系统的响应机制与反馈效应.

茶树(*Camellia sinensis*)是我国南方丘陵红壤区广泛种植的经济作物之一.尽管茶树喜生于酸性土壤中,但酸雨发生后土壤酸化的加剧,已成为影响茶树生长和茶叶品质的关键因素.本文以位于典型红壤和酸沉降叠加区的江西茶园为对象,通过长期原位模拟酸雨沉降试验,开展 4 种不同强度酸雨对茶树主要器官 N、P 含量及其化学计量比的影响研究,评价茶树体不同器官及不同功能或年龄组织对外界胁迫的响应敏感性.研究结果将加深对酸雨环境下茶园元素循环过程及调控机制的理解,为丘陵红壤区茶园可持续经营及应对酸雨危害提供参考.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省中部偏北南昌县黄马乡(28°20' N、116°01' E,海拔 30 m),该区为典型中亚热带湿润季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷少雨.年均气温 17.1~17.7 °C,年降雨量 1600~1800 mm,4—6 月雨量约占全年降雨量的一半.全年降水天数 129~161 d,多发生在春季,全年平均相对湿度为 77%^[13].土壤类型为红壤,适合茶树生长^[17-18].研究区降水多为酸性,pH 4.0~4.5,为典型硫酸型酸雨,且近年来呈现从硫酸型酸雨向硝酸型过渡的趋势^[19].

1.2 试验设计

2010 年 12 月,选取位于中上坡、排水条件良好的 25 年生茶园.在茶园随机选取 12 个 4 m×3 m 样方,每个样方之间相隔 4 m.按单因素 4 水平 3 次重复完全随机化进行试验设计,单因素为模拟酸雨(H₂SO₄:HNO₃=3:1),4 水平包括对照(自来水,pH 7.0)、pH 4.5、pH 3.5、pH 2.5.结合实际降雨分布、茶园常规管理等情况,酸雨频度为每 15 d 均匀喷浇 1 次,每年连续进行,每次每个样方为 24 L 溶液或水,溶液配置后用 pH 计测定酸度,用 NaOH 溶液调整 pH 值^[13,20].所选茶树品种为福鼎大白,平均株高 1.2 m,主干基径 3~5 cm,生长状态良好,除模拟酸雨处理外,茶园采用常规经营管理措施.

1.3 样品采集

2013 年 3 月春茶采收期,采用土钻法,在茶树体冠幅范围内随机选取 9 个点采集 0~20 cm 土层土壤,同一样方内土壤混合为一个样品,挑出肉眼可见的根系和凋落物后分为 2 份.1 份新鲜土壤用于测定土壤铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)和有效磷(AP)等速效养分指标;另一份自然风干,测定土壤 pH,以及土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量.

在每个样方内随机选取 3 株标准茶树,采用挖掘法全株拔起,分别收集根系、小枝和叶片.根据根序分级理论将收集到的根系分为吸收根(即最前端的 1~3 级)、运输根(4~5 级)和储藏根(>5 级,且直径<8 mm)^[21];小枝和叶片根据其年龄分为幼枝

(当年生枝)和老枝(2 年或 3 年生枝)、新叶(一芽两叶、当年生叶)和老叶(成熟叶片、2 年或 3 年生叶).同一样方内 3 株茶树相同部位的植物样品混合后烘干,磨碎,过筛,用于 N、P 含量测定.

1.4 样品测定

土壤 SOC 含量采用重铬酸钾-硫酸外加热法测定^[22];土壤和植物体 TN 和 TP 含量采用浓硫酸-双氧水消化法提取,TN 含量采用半自动流式分析仪测定,TP 含量用磷钼蓝比色法测定;土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量分别采用靛酚兰比色法和镀铜镉还原-重氮偶合比色法测定;有效 P 含量采用 NaHCO₃ 溶液提取,钼锑抗比色法测定^[13];pH 值采用水浸提酸度计法(水:土为 2.5:1)测定.

1.5 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 17.0 软件对数据进行统计分析.采用双因素(酸雨强度和不同功能根系或不同年龄枝、叶)和最小显著差异法(LSD)进行 4 种酸雨强度、3 种功能根系和不同年龄枝叶的多重比较($\alpha=0.05$),用 Pearson 法对茶园土壤和茶树体不同器官养分含量进行相关性分析.利用 Excel 2010 软件作图.图表中数据为平均值±标准误.

为综合分析茶树体不同器官对酸雨响应的差异,将对酸雨的响应敏感度定义为:不同强度酸雨与对照差值的平方和的相对变异幅度^[23],即:

$$SI=\sqrt{\frac{(C_{4.5}-C_{CK})^2+(C_{3.5}-C_{CK})^2+(C_{2.5}-C_{CK})^2}{3C_{CK}^2}}\times 100\%$$

式中:SI 为某个组织的酸雨响应敏感度(%);C_{CK}、C_{4.5}、C_{3.5}、C_{2.5}分别为对照、pH 4.5、pH 3.5 和 pH 2.5 酸雨处理下植物组织的养分含量.

2 结果与分析

2.1 土壤氮磷供应对不同强度连续酸雨的响应

表 1 不同强度连续酸雨处理茶园土壤养分含量及其化学计量比

Table 1 Soil nutrient contents and their stoichiometric ratios in tea plantation continuously treated by simulated acid rain of various intensities

处理 Treat- ment	有机碳 Organic carbon (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (g·kg ⁻¹)	N/P	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N (g·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N (g·kg ⁻¹)	矿质氮 Mineral nitrogen (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus (mg·kg ⁻¹)	矿质氮/ 有效磷 MN/AP	pH
CK	11.50± 0.89a	1.50± 0.08a	0.87± 0.11a	1.75± 0.12a	5.89± 0.47a	2.54± 0.18a	8.43± 0.39a	15.80± 0.88a	0.61± 0.03b	4.05± 0.03a
pH 4.5	12.08± 1.12a	1.73± 0.16a	0.90± 0.08a	1.99± 0.32a	5.41± 0.34a	2.44± 0.32a	7.85± 0.18a	15.71± 0.98a	0.50± 0.05b	3.98± 0.01b
pH 3.5	11.73± 0.74a	1.57± 0.16a	0.89± 0.03a	1.77± 0.18a	5.36± 0.36a	1.70± 0.21b	7.06± 0.48a	13.47± 1.27ab	0.53± 0.06b	3.99± 0.02b
pH 2.5	12.40± 0.92a	1.80± 0.28a	0.77± 0.07a	1.99± 0.17a	6.01± 0.72a	1.71± 0.13b	7.72± 0.70a	10.17± 0.74b	0.76± 0.06a	3.98± 0.02b

CK: 对照 Control. 不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$) Different letters meant significant difference among treatments at 0.05 level.

酸雨连续处理 3 年后,土壤 NO₃⁻-N 和有效 P 含量随酸雨强度增加呈现下降趋势,且在 pH 2.5 处理与对照间差异显著;与对照相比,pH 2.5 处理下土壤 NO₃⁻-N 和有效 P 含量分别降低了 32.7% 和 35.6%.酸雨处理显著降低 pH 值,与对照相比,pH 4.5、pH 3.5、pH 2.5 处理下土壤 pH 值分别降低了 1.8%、1.5%、1.8%;同时,pH2.5 处理显著提高了矿质 N 与有效 P 的比值(MN/AP).土壤 SOC、TN、TP、N/P、NH₄⁺-N 和矿质 N 在 4 种酸雨强度处理间差异不显著(表 1).

2.2 茶树体氮磷含量及其化学计量比对不同强度酸雨的响应

不同强度酸雨连续处理对茶树根系 N、P 含量的影响与其根系类型有关.由图 1 可以看出,连续酸雨处理 3 年后,吸收根 N 含量随酸雨强度增加而提高,与对照相比,pH 4.5、pH 3.5、pH 2.5 处理吸收根 N 含量分别增加 22.9%、21.0% 和 32.9%,而运输根和储藏根 N 含量对酸雨处理响应不敏感.同时,储藏根 P 含量在 pH 4.5 处理下显著提高,但随酸雨强度增加而降低.根系 N/P 变化趋势与根系 N 含量相似,吸收根 N/P 随着酸雨强度增加显著提高,其中,pH 2.5 处理显著提高了 35.6%,储藏根 N/P 在对照与不同强度酸雨间无显著差异,但 pH 2.5 处理显著高于 pH 4.5 和 pH 3.5 处理.方差分析显示,酸雨处理强度对根系 P 含量和 N/P 影响显著,根系类型对其 N 含量和 N/P 影响显著,酸雨处理强度和根系类型对根系 N 含量影响有交互作用.

由图 2 可以看出,新叶和老叶的 N、P 含量对不同强度酸雨处理响应不敏感,但老叶 N/P 在 pH 4.5、pH 3.5 处理下有增加趋势,且 pH 3.5 处理下增加显著.与叶片对酸雨处理的响应不同,与对照相比,新枝 N 含量和 N/P 在 pH4.5 处理下显著提高,

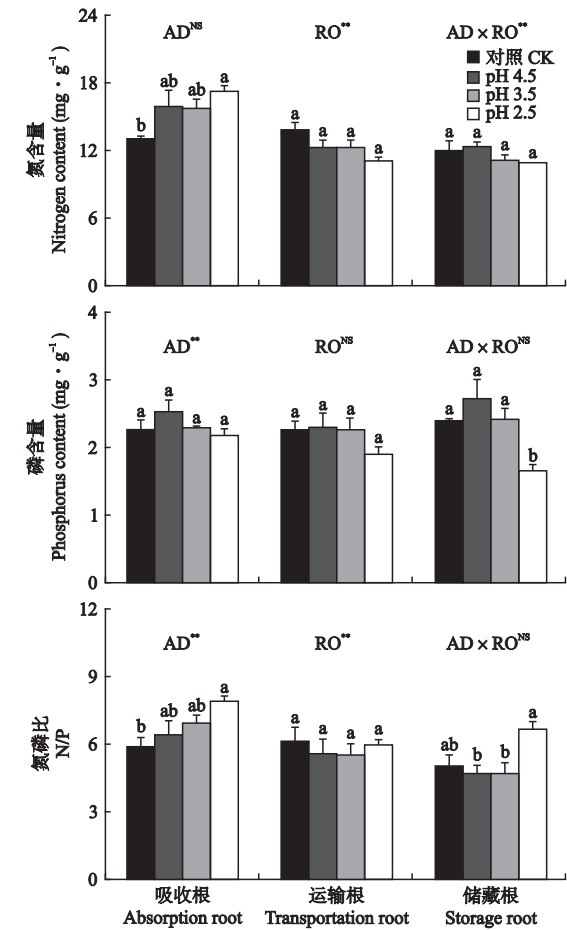


图 1 模拟不同强度酸雨处理 3 年后茶树体不同功能根系氮磷含量及其化学计量比

Fig.1 Nitrogen, phosphorus contents and N/P in different functional roots of tea plants continuously treated with 3-year simulated acid rains of various intensities.

AD: 酸雨处理 Acid deposition; RO: 根系功能级 Root order. NS: $P > 0.05$; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. 不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

且随酸雨强度的增加而降低,但枝条的 P 含量对不同强度酸雨处理响应不敏感.方差分析表明,叶片年龄及其与酸雨处理的相互作用对叶片 N、P 含量及其化学计量比无显著影响,但枝条年龄对枝条 N、P 含量有显著影响,且枝条年龄和酸雨处理对枝条 N 含量影响具有交互作用.

由图 3 可以看出,茶树组织 N 含量对酸雨处理的敏感性主要与组织年龄和功能有关,不同组织 N 含量的平均响应系数为 17.0%,其中,吸收根、新叶和新枝 N 含量对酸雨响应敏感度系数较高,分别为 27.9%、20.5%、16.3%,而其他部位 N 含量对酸雨响应敏感度在 14%左右,差异不大,老枝 N 含量对酸雨敏感度最低,为 11.1%.茶树根系和叶片 P 含量对酸雨处理的敏感性较大,储藏根 P 含量对酸雨响应

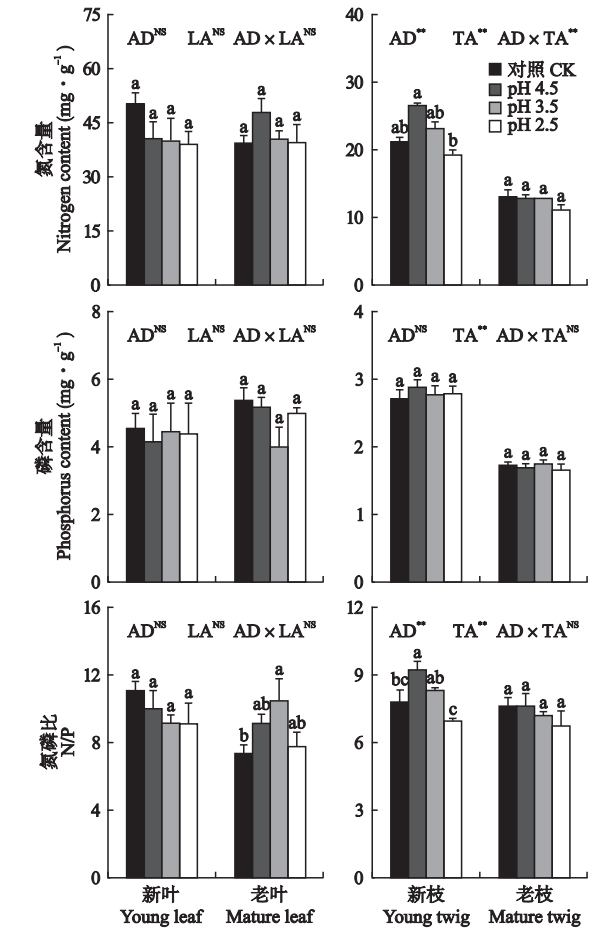


图 2 模拟不同强度酸雨处理茶树体不同年龄枝叶氮磷含量及其化学计量比

Fig.2 Nitrogen, phosphorus contents and N/P in different-age leaves and twigs of tea plants treated with simulated acid rains of various intensities.

LA: 叶龄 Leaf age; TA: 枝龄 Twig age.

敏感度最高,为 21.9%,其次是新叶、老叶,而老枝的 P 含量对酸雨响应敏感度系数最低.

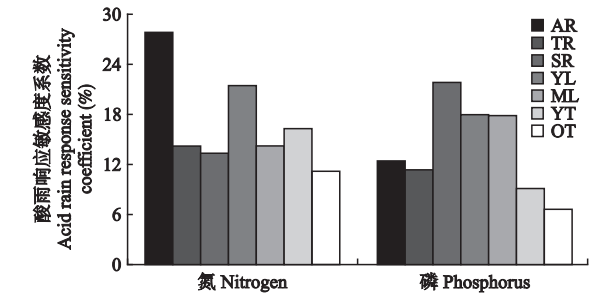


图 3 模拟不同强度酸雨处理 3 年后茶树体不同器官的酸雨响应敏感度系数

Fig.3 Acid rain response sensitivity of different tea organs continuously treated with 3-year simulated acid rains of various intensities.

AR: 吸收根 Absorption root; TR: 运输根 Transportation root; SR: 储藏根 Storage root; YL: 新叶 Young leaf; ML: 老叶 Mature leaf; YT: 新枝 Young twig; OT: 老枝 Old twig. 下同 The same below.

表 2 模拟不同强度酸雨处理茶树不同功能根系与不同年龄枝叶氮磷含量的相关系数
Table 2 Correlation coefficients of nitrogen and phosphorus contents of tea roots, twigs and leaves with different ages in different simulated acid rain treatments

	根系功能级 Root order	新叶 N Young leaf N	老叶 N Mature leaf N	新枝 N Young twig N	老枝 N Old twig N	新叶 P Young leaf P	老叶 P Mature leaf P	新枝 P Young twig P	老枝 P Old twig P
根氮含量 Root N content	AR	-0.36	0.15	-0.05	-0.46	0.21	-0.13	0.04	0.08
	TR	0.40	-0.17	0.29	0.52	-0.01	0.35	0.15	0.12
	SR	0.05	0.20	0.56	0.61 *	-0.13	0.11	-0.19	0.33
根磷含量 Root P content	AR	-0.12	0.15	0.59 *	-0.03	-0.17	0.08	0.71 * *	-0.30
	TR	0.69 *	0.72 * *	0.39	0.42	0.52	0.30	-0.22	-0.09
	SR	0.25	0.53	0.70 *	0.70 *	0.02	-0.03	-0.15	0.09

* $P<0.05$; * * $P<0.01$.

2.3 地下-地上养分关联性分析

由图 4 可知,吸收根 N 含量与 pH 呈显著负相关,运输根 N 含量与 NO_3^- -N、pH 呈显著正相关,储藏根 N 含量与 NO_3^- -N 呈显著正相关;新叶 N 含量与 pH 呈显著正相关,而老叶和新枝 N 含量与有效 P 呈显著正相关;老枝 N 含量与 NH_4^+ -N 呈显著负相关.运输根 P 含量与有效 P、pH 呈显著正相关,储藏根 P 含量与有效 P 呈显著正相关;新、老叶 P 含

量与 NH_4^+ -N 呈显著正相关,新叶 P 含量与土壤全 P 呈显著负相关,老叶 P 含量与矿质 N 呈显著正相关,而吸收根、新枝和老枝 P 含量与土壤理化指标无显著相关性.

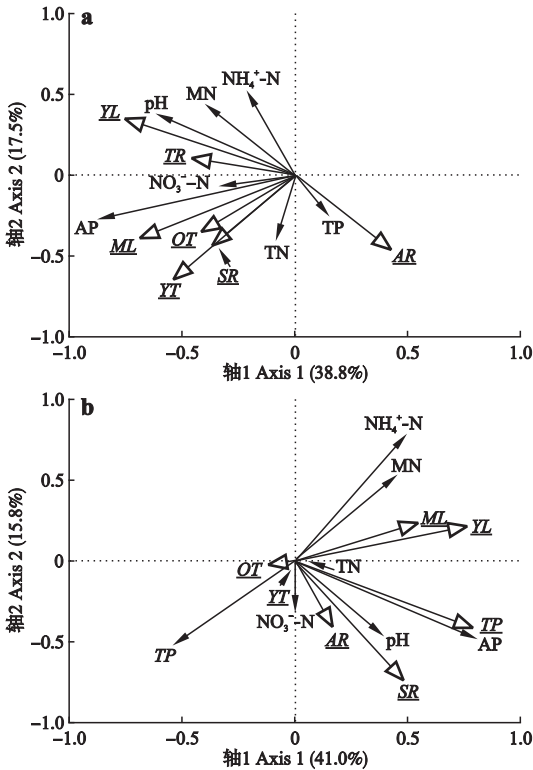
根系 N、P 含量与叶片和枝条 N、P 含量密切相关.储藏根 N 含量与老枝 N 含量显著正相关;吸收根的 P 含量与新枝 N 和新枝 P 含量呈显著正相关;同样,运输根 P 含量与新叶和老叶 N 含量呈显著正相关;而储藏根 P 含量与新枝、老枝 N 含量呈显著正相关(表 2).

3 讨 论

模拟酸雨处理显著影响了土壤有效 N、P 养分供应及茶树对养分的吸收^[8,13].本研究表明,吸收根 N 含量随酸雨强度增加显著提高,同时低强度酸处理(pH 4.5)后新枝 N 含量显著提高(图 1、2).一般来说,除植物自身的遗传特性外,植物体 N 含量主要受到土壤养分供应的影响^[24-25].本研究中,土壤养分含量在酸雨处理后显著降低,如硝态 N 和有效 P,这是由于酸雨改变微生物组成和活性,进而影响土壤硝化和氨化速率及磷的矿化速率.尽管土壤硝态 N 含量随酸雨强度增加显著降低,但植物器官 N 含量在低强度酸雨下显著增加,这可能是植物应对酸雨处理后土壤养分供应缺乏的策略之一^[6,26-27].因为当土壤中某种必需元素含量较低时,植物会最大限度地吸收这种元素,这可有效抑制土壤养分流失,而当土壤中某种必需元素含量高时,则植物被迫吸收一定数量,从而增加植物养分含量^[26].酸雨处理抑制土壤速效养分供应,并加速植物营养阳离子的淋洗,这迫使植物吸取超过自身所需的养分,以养分库形式抵抗酸雨的影响.因此,茶树体 N 含量在低强度酸处理下显著提高.

随着酸雨处理强度的增加,新叶和新枝 N 含量有下降趋势,并且新枝 N 含量在 pH 2.5 处理下显著

图 4 模拟不同强度酸雨处理 3 年后茶园土壤养分供应和茶树体氮(a)磷(b)含量关联性的冗余分析
Fig.4 Redundancy analysis of relevance among soil nutrient levels and plant organ nitrogen (a) and phosphorus (b) contents in tea plantation continuously treated with 3-year simulated acid rains with various intensities.
TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; MN: 矿质氮 Mineral nitrogen; AP: 有效磷 Available phosphorus.



低于 pH 4.5 处理.土壤酶在土壤养分生物地球化学循环中起重要作用,其主要来自土壤微生物和植物根系,酸雨处理会改变土壤理化特性,影响土壤微生物组成和酶活性,而土壤中微生物会对土壤理化的改变产生正反馈,并最终影响植物的养分和生长^[8,28-29].酸雨处理会引起土壤中耐碱性和中性的微生物数量减少,如细菌,而使喜酸微生物数量得到提高,如真菌和木霉等.从而导致土壤中氨化作用、硝化作用减弱,纤维素分解作用增强及相关酶活性降低^[6].前期研究也发现,pH 4.5、pH 3.5 和 pH 2.5 酸雨处理后根际土壤 N 净矿化速率分别降低了 3.6%、12.7% 和 38.8%,P 矿化速率分别降低了 31.5%、41.8% 和 63.0%^[13].因此,推测尽管低强度酸雨处理可增加茶树器官的 N 含量,但随着酸雨处理时间或强度的增加,最终会影响茶树的养分吸收,导致器官 N 含量降低.

不同年龄和功能的茶树器官 N 含量对酸雨处理响应不同,总体上幼嫩组织 N 含量对酸雨处理响应较为敏感,这一研究结果也得到酸雨敏感强度系数的支持,其中,吸收根、新叶、老叶的酸雨敏感系数高于其他组织.这可能是由于幼嫩组织生长旺盛,养分需求强烈,更易受土壤养分供应状况的影响^[17,22];另一方面,幼嫩组织抵御外界环境变化的能力相对较差,易受到酸雨处理对根系等组织的直接影响^[17,26].因此,酸雨处理后幼嫩组织 N 含量比成熟组织敏感.

与茶树器官 N 含量对酸雨处理的响应不同,器官 P 含量整体上对酸雨处理的响应不敏感.叶片和枝条 P 含量在 4 种酸雨处理下无显著差异,仅储藏根的 P 含量在 pH 2.5 处理下显著降低.生态系统的 P 循环是由植物对 P 的需求所拉动,由土壤有效 P 的持续供应来维持,这些过程是由植物与土壤之间的相互作用实现^[13,30-31].因此,茶树器官的 P 含量不仅与土壤的供应有关,很大程度上也由植物对 P 的需求所决定^[31].N/P 可在一定程度上反映养分对植物生长的限制和植物对养分的需求.Braakhekke 等^[32]研究认为,当植物叶片 N/P>14 且叶片全 P 含量<1 g·kg⁻¹时,则该生态系统受 P 限制;当叶片 N/P<10 且 N 含量<20 g·kg⁻¹,则该生态系统受到 N 限制.而 Koerselman 等^[10]认为,N/P>16 时,生态系统受 P 限制;当 N/P<14 时,生态系统受 N 限制;而在 14<N/P<16,被认为受 N、P 共同限制.尽管在不同生态系统中养分限制的生态化学计量比存在差异,但本研究中茶树各器官 N/P 为 5.1~11.7,根、叶

和枝 N/P 平均值都小于 10(分别为 5.9、9.3 和 7.7),说明茶树器官主要受到 N 含量的限制.因此,茶树器官在应对土壤 N、P 供应不足时,更多地吸收 N,因此器官 P 含量对酸雨处理响应不敏感.同样,由于茶树器官 N、P 含量对酸雨处理响应的差异,导致老叶 N/P 在 pH 3.5 处理时显著增加,新枝的 N/P 在 pH 4.5 时显著提高,说明由于 N、P 对酸雨处理响应的不同,适度酸雨处理增加了器官 N/P,一定程度上减缓了 N 对植物生长的限制,但增加了器官的 P 需求,影响茶树体器官 N、P 含量平衡^[8,13].酸雨处理对茶树体 N、P 平衡的改变可能会显著影响茶树生长.

相关分析显示,茶树根系 N 含量主要受土壤硝态 N 含量影响,根系 P 含量与土壤有效 P 关系密切,酸雨处理对植物养分的影响首先要经过土壤-植物的相互联系起作用,而根系是与土壤直接接触的植物器官,因此茶树根系养分含量主要受土壤养分决定^[13,33].相比之下,枝条和叶片 N 含量与有效 P 关系密切,而其 P 含量又与铵态 N 和矿质 N 含量呈正相关,这可能由于茶树为维持体内养分的平衡,在吸收一定量 N 后,需要吸收一定量 P 以达到 N/P 平衡,反之亦然.

总体来看,随着酸雨强度的增加土壤酸化加重,土壤有效养分供应能力下降,而适度酸雨处理增加了茶树体幼嫩器官的 N 含量,而器官 P 含量对酸雨处理响应不敏感,酸雨处理增加了 N/P,改变茶树体的 N、P 平衡.因此,酸雨对南方茶园生态系统养分循环的长期影响应受到持续关注.

参考文献

- [1] Wu D (吴 丹), Wang S-G (王式功), Shang K-Z (尚可政). Progress in research of acid rain in China. *Arid Meteorology* (干旱气象), 2006, **24**(2): 70-77 (in Chinese)
- [2] Yi J-X (易杰祥), Lv L-X (吕亮雪), Liu G-D (刘国道). Research on soil acidification and acidic soil's melioration. *Journal of South China University of Tropical Agriculture* (华南热带农业大学学报), 2006, **12**(1): 23-28 (in Chinese)
- [3] Likens GE, Driscoll CT, Buso DC. Long-term effects of acid rain: Response and recovery of a forest ecosystem. *Science*, 1996, **272**: 244-246
- [4] Liao B-H (廖柏寒), Jiang Q (蒋 青). Acid deposition and acidification of forest soils in southern China. *Agro-Environment Protection* (农业环境保护), 2002, **21**(2): 110-114 (in Chinese)
- [5] Fu X-P (付晓萍), Tian D-L (田大伦). Research pro-

- gress of the effect of acid rain on plant. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2006, **21**(4): 23–27 (in Chinese)
- [6] Liu K-H (刘可慧), Peng S-L (彭少麟), Mo J-M (莫江明), *et al.* The process and mechanism of rain deposition upon forest plants. *Ecology and Environment* (生态环境), 2005, **14**(6): 953–960 (in Chinese)
- [7] Tang S-S (唐仕姗), Yang W-Q (杨万勤), Xiong L (熊莉), *et al.* C, N and P stoichiometric characteristics of different root orders for three dominant tree species in subalpine forests of western Sichuan, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(2): 363–369 (in Chinese)
- [8] Liu J-X (刘菊秀). Current and future study about effects of acid deposition on forest ecosystems. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2003, **22**(5): 113–117 (in Chinese)
- [9] Tong G-H (童贯和), Liang H-L (梁惠玲). Effects of simulated acid rain and its acidified soil on soluble sugar and nitrogen contents of wheat seedlings. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(8): 1487–1492 (in Chinese)
- [10] Koerselman W, Meuleman AF. The vegetation N:P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, 1996, **33**: 1441–1450
- [11] Chen FS, Feng X, Liang C. Endogenous versus exogenous nutrient affects C, N, and P dynamics in decomposing litters in mid-subtropical forests of China. *Ecological Research*, 2012, **27**: 923–932
- [12] Liu G-S (刘广深), Xu Z-J (许中坚), Xu W-B (徐文彬), *et al.* Decline of available phosphorus in soil affected by ‘acid rain’. *Acta Mineralogica Sinica* (矿物学报), 2002, **22**(1): 35–38 (in Chinese)
- [13] Chen X (陈希), Chen F-S (陈伏生), Ye S-Q (叶素琼), *et al.* Responses of rhizosphere nitrogen and phosphorus transformations to different acid rain intensities in a hilly red soil tea plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(1): 1–8 (in Chinese)
- [14] Ling D-J (凌大炯), Zhang J-E (章家恩), Ouyang Y (欧阳颖). Advancements in research on impact of acid rain on soil ecosystem: A review. *Soils* (土壤), 2007, **39**(4): 514–521 (in Chinese)
- [15] Zhang H (张华), Yang Y-K (杨永奎), Xie D-T (谢德体), *et al.* Effect of acid rain on leaching loss of nitrogen and phosphorus. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2007, **21**(1): 22–25 (in Chinese)
- [16] Feng Z-W (冯宗炜), Zhang J-W (张家武), Chen C-Y (陈楚莹). Injuries to tree leaves by simulated acid rain and resistant nature of the trees. *Environment Science* (环境科学), 1988, **9**(5): 30–33 (in Chinese)
- [17] Li J (李敬), Hu X-F (胡小飞), Duan X-H (段小华), *et al.* Effects of simulated acid rain and aluminum addition on growth and physiological and biochemical characteristics of tea plants. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis* (江西农业大学学报), 2012, **34**(6): 1186–1192 (in Chinese)
- [18] Zhu YX, Chen FX. The magnesium nutrition of tea garden on hilly red soil of southern China. *Journal of Tea Science*, 2000, **20**: 95–100
- [19] Zeng K (曾凯), Ju W-M (居为民), Tu L-Y (涂良瑛), *et al.* Characteristics of acid rain in the suburb and urban areas of Nanchang during 2006 and 2007. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2010, **29**(3): 609–612 (in Chinese)
- [20] Lee JJ, Neely GE, Perrigan SC, *et al.* Effect of simulated sulfuric acid rain on yield, growth and foliar injury of several crops. *Environmental and Experimental Botany*, 1981, **21**: 171–185
- [21] Liu Y (刘煜), Hu X-F (胡小飞), Chen F-S (陈伏生), *et al.* Temperature sensitivity of CO₂ fluxes from rhizosphere soil mineralization and root decomposition in *Pinus massoniana* and *Castanopsis sclerophylla* forests. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(6): 1501–1508 (in Chinese)
- [22] Fang XM, Chen FS, Hu XF. Aluminum and nutrient interplay across an age-chronosequence of tea plantations within a hilly red soil farm of subtropical China. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, **60**: 448–459
- [23] Singh AJ, Byerlee D. Relative variability in wheat yields across countries and over time. *Journal of Agricultural Economics*, 1990, **41**: 21–32
- [24] Chen FS, Niklas KJ, Liu Y, *et al.* Nitrogen and phosphorus additions alter nutrient dynamics but not resorption efficiencies of Chinese fir leaves and twigs differing in age. *Tree Physiology*, 2015, **35**: 1106–1117
- [25] Nordin A, Högberg P, Näsholm T. Soil nitrogen form and plant nitrogen uptake along a boreal forest productivity gradient. *Oecologia*, 2001, **129**: 125–132
- [26] Yang X-H (杨秀虹), Qiu R-L (仇荣亮), Cen H-X (岑慧贤). Study on sensitivity of terrestrial ecosystem to acid deposition and influencing factors. *Agro-Environmental Protection* (农业环境保护), 1999, **18**(2): 92–95 (in Chinese)
- [27] Wu D (吴迪), Zhang R (张蕊), Gao S-H (高升华), *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on the each component of soil respiration in the *Populus L.*

plantations in a riparian zone of the mid-lower Yangtze River. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2015, **35** (3): 717–724 (in Chinese)

[28] Dick RP. Soil enzyme activities as integrative indicators of soil health// Pankhurst CE, Doube BM, Gupta VVSR, eds. *Biological Indicators of Soil Health*. Wallingford, UK: CAB International, 1997: 121–156

[29] Liang J (梁 骏), Mai B-R (麦博儒), Zheng Y-F (郑有飞), *et al.* Effects of simulated acid rain on the growth, yield and quality of rape. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(1): 274–283 (in Chinese)

[30] Bollons HM, Barraclough PB. Inorganic orthophosphate for diagnosing the phosphorus status of wheat plants. *Journal of Plant Nutrition*, 1997, **20**: 641–655

[31] Zhao Q (赵 琼), Zeng D-H (曾德慧). Phosphorus cycling in terrestrial ecosystems and its controlling factors. *Acta Phytocceotgica Sinica* (植物生态学报), 2005, **29**(1): 153–163 (in Chinese)

[32] Braakhekke WG, Hooftman DA. The resource balance hypothesis of plant species diversity in grassland. *Journal of Vegetation Science*, 1999, **10**: 187–200

[33] Hodge A. The plastic plant: Root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *New Phytologist*, 2004, **162**: 9–24

作者简介 张宇飞, 男, 1993 年生, 硕士研究生. 主要从事土壤-植物养分循环研究. E-mail: 15797627087@163.com

责任编辑 孙 菊
