

DOI: 10.5846/stxb201904020634

金强, 安婉丽, 刘旭阳, 陈晓旋, 林少颖, 王维奇. 模拟酸雨对福州沿江稻田水稻叶片碳氮磷含量及其生态化学计量学特征的影响. 生态学报, 2020, 40(9): 3085-3095.

Jin Q, An W L, Liu X Y, Chen X X, Lin S Y, Wang W Q. Effects of simulated acid rain on carbon, nitrogen, phosphorus contents and the ecological stoichiometry of rice leaves in Fuzhou rice fields along the river. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(9): 3085-3095.

模拟酸雨对福州沿江稻田水稻叶片碳氮磷含量及其生态化学计量学特征的影响

金 强¹, 安婉丽¹, 刘旭阳¹, 陈晓旋¹, 林少颖¹, 王维奇^{1,2,*}

¹ 福建师范大学地理研究所, 福州 350007

² 福建师范大学湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福州 350007

摘要:为阐明酸雨对早、晚稻叶片不同时期碳(C)、氮(N)、磷(P)含量及其生态化学计量学特征的影响,设置对照(Control, CK)、pH4.5、pH3.5酸雨处理,对福州沿江稻田早、晚稻叶片不同时期C、N、P含量及其生态化学计量学特征进行测定和分析。研究表明:早稻叶片C、N、P含量在拔节期和成熟期分别为(401.08±1.83)、(37.01±2.54)、(1.01±0.05) g/kg和(349.08±4.52)、(15.52±0.05)、(0.48±0.01) g/kg,晚稻C、N、P含量在拔节期和成熟期分别为(389.00±2.82)、(28.52±0.31)、(0.74±0.01) g/kg和(317.25±1.65)、(8.18±0.51)、(0.29±0.03) g/kg,早稻叶片养分含量整体显著高于晚稻($P<0.05$),且各处理拔节期养分含量均显著高于成熟期含量($P<0.05$),整体上,酸雨处理可显著降低早稻叶片在拔节期的C、N、P含量($P<0.05$)。早稻叶片C/N、C/P、N/P在拔节期和成熟期分别为(10.94±0.77)、(400.13±18.91)、(36.77±2.07)和(23.19±0.63)、(737.04±30.47)、(32.08±1.03),晚稻叶片C/N、C/P、N/P在拔节期和成熟期分别为(13.74±0.26)、(528.10±0.26)、(38.70±0.74)和(39.61±2.11)、(1148.97±103.82)、(28.90±1.27),整体上,晚稻叶片各项比值高于早稻,根据各处理之间叶片的N/P值发现,模拟酸雨并未改变水稻P限制现状,在水稻生长的过程中,尤其是在拔节期需要追施适量的磷肥。

关键词:酸雨;水稻叶片;碳、氮、磷;生态化学计量学

Effects of simulated acid rain on carbon, nitrogen, phosphorus contents and the ecological stoichiometry of rice leaves in Fuzhou rice fields along the river

JIN Qiang¹, AN Wanli¹, LIU Xuyang¹, CHEN Xiaoxuan¹, LIN Shaoying¹, WANG Weiqi^{1,2,*}

¹ Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

² Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: In order to clarify the effects of acid rain on carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) contents and ecological stoichiometry of riceleaves, we set the control (CK), pH4.5 and pH3.5 acid rain treatments. C, N and P contents and their ecological stoichiometry were measured and analyzed in different rice growth stages in the paddy field of Fuzhou rice fields along the river. The results showed that the carbon, nitrogen and phosphorus contents in early rice leaves were 401.08±1.83 g/kg, 37.01±2.54 g/kg, 1.01±0.05 g/kg during rice jointing stage and 349.08±4.52 g/kg, 15.52±0.05 g/kg, 0.48±0.01 g/kg during maturity stage. The carbon, nitrogen and phosphorus contents in late rice leaves were 389.00±2.82 g/kg, 28.52±0.31 g/kg, 0.74±0.01 g/kg during rice jointing stage and 317.25±1.65 g/kg, 8.18±0.51 g/kg, 0.29±0.03 g/kg during maturity stage. The nutrient content of early rice leaves was higher than that of the late rice ($P<$

基金项目:国家自然科学基金项目(41571287);福建省公益类科研院所专项(2018R1034-1);福建省高校杰出青年科研人才培养计划2017

收稿日期:2019-04-02; **网络出版日期:**2020-03-16

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

0.05), and the nutrient content in the jointing stage was higher than that in the mature stage ($P < 0.05$). On the whole, the carbon, nitrogen and phosphorus contents of early rice leaves were decreased by the acid rain treatment during the jointing stage ($P < 0.05$). The C/N, C/P, and N/P ratios in early rice leaves were 10.94 ± 0.77 , 400.13 ± 18.91 , 36.77 ± 2.07 during rice jointing stage, and 23.19 ± 0.63 , 737.04 ± 30.47 , 32.08 ± 1.03 during the maturity stage. The C/N, C/P, and N/P ratios in late rice leaves were 13.74 ± 0.26 , 528.10 ± 0.26 , 38.70 ± 0.74 during rice jointing stage, and 39.61 ± 2.11 , 1148.97 ± 103.82 , 28.90 ± 1.27 during the maturity stage. On the whole, the ratio of late rice leaves were higher than that of the early rice. According to the N/P ratio among treatments, the status of rice phosphorus limitation was not changed. It is necessary to apply proper amount of phosphate fertilizer in rice growth, especially during the jointing stage.

Key Words: acid rain; rice leaves; carbon, nitrogen, phosphorus; ecological stoichiometry

生长速率理论是生态化学计量学的基本理论之一,该理论主要强调有机体通过调整内部 C/N/P 比值以适应生长速率的改变,而植物叶片 C/N/P 比值的生长变化反映了植物生长速率的变化^[1],因此,在酸雨频率和酸雨覆盖面积不断加快和扩张的大背景下,对植物叶片碳(C)、氮(N)、磷(P)等关键元素及其生态化学计量比动态平衡的研究有助于理解植物对外界环境的生长适应策略。C 是构成植物体干物质最主要的元素^[2], N、P 是植物生长所必需的营养元素^[3],不同营养元素的比值也具有不同的指示意义,C/N 是植物叶片光合产物分配方向的重要指标,在一定程度上可表征植物 C、N 代谢协调程度^[4]。C/P 是衡量植物生长速率的重要指标^[5]。而叶片 N/P 是影响植物代谢状况的重要因子,可作为判断环境对植物生长的养分供给状况的重要指标^[6]。C/N/P 可用于预测有机物的分解速率和营养限制^[7]。由于受季节变化^[1]、环境胁迫^[8-9]、土壤结构特征^[10]、水肥管理^[11]、地域差异^[12]等因素的影响,植物叶片 C、N、P 化学计量比呈现出复杂性特征,而酸雨作为环境胁迫的重要因子,可直接或间接对叶片 C/N/P 造成重要影响。部分研究表明,在植物生境改变的情况下,不同生育期内叶片的 C/N/P 比值响应存在差异^[13]。由酸雨导致的土壤酸化可显著改变土壤养分供应和酶活性,降低土壤 N 和 P 矿化速率^[14],这将影响植物的 N、P 养分吸收及其化学计量特征^[15]。然而,目前国内在对生态化学计量学原理的研究,主要集中于森林生态系统^[12,16],但对于农田生态系统,特别是稻田叶片的 C、N、P 含量及其生态化学计量比的研究相对较少。

酸雨是指 pH 值小于 5.6 的降水,它是因人为或自然等原因导致区域降水酸化的一种污染现象^[17]。当前,随着煤炭燃烧、工业排放、汽车尾气等人为活动的不断增加,我国华南地区多次遭受了酸雨的影响,部分地区酸雨 pH 值低于 4.5^[18],福建近年酸雨频发,降水 pH 在 4.5 以下也不鲜见,其多年降水 pH 值在 4.0—5.5 之间^[19],酸雨会导致土壤酸化,营养物质流失,进而导致土壤肥力降低,土壤结构退化,农作物减产^[20]。因此,对降低酸雨影响的策略研究意义较大。叶作为植物光合作用的主要器官,酸雨对植物叶片的影响主要表现在两个方面,一方面是通过影响叶片的生理生化过程,直接影响植物的生长发育;另一方面是通过一系列的物理、化学和生物过程导致土壤酸化,从而间接改变植物的生长环境^[21]。当前已有研究表明,酸雨会对地表植物叶片造成直接伤害,破坏叶片中的细胞器、叶肉等组织,降低叶片的光合作用和叶绿素含量,并引起叶片褪绿和坏死^[22-23];酸雨导致的土壤酸化也使大量 H^+ 进入植物细胞质,降低细胞酶活性,诱导生物自由基产生,导致细胞膜脂质过氧化,引起细胞结构破坏与解体,进而间接影响植物生长发育与品质^[24],但关于酸雨影响下叶片 C、N、P 及其生态化学计量比特征变化的研究尚鲜见报道。

水稻作为世界三大粮食作物之一,在我国乃至世界上均具有重要地位,而模拟酸雨对其影响还待进一步研究。因此,本文以福州水稻田为研究区域,通过模拟酸雨探讨其对早晚稻叶片不同时期的 C、N、P 含量及其生态化学计量学特征的影响,以期应对当前酸雨危害和保障粮食安全提供参考依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

本实验区位于福建省农业科学院水稻研究所吴凤基地,该基地拥有永久农田 19.07 公顷,该地区为亚热

带海洋性季风气候,年平均气温为 19.6℃,全年无霜期 330 d,年平均降水量一般在 800—1500 mm,区内地形主要为冲海积平原,经测定,该基地土壤耕作层(0—15 cm) pH 值为 6.5,全碳(TC)含量为 18.16 g/kg、全氮(TN)含量为 1.93 g/kg、全磷(TP)含量为 1.80 g/kg,粘粒、砂粒、壤粒在总粒径中的占比分别为 12%、28%、60%^[25]。区内主要实行早稻-晚稻-蔬菜的轮作制度。实验区早稻栽培品种为江西省农科院研发的禾盛 10 号,为中熟常规早籼,生长周期为 2015 年 4 月 16 日—2015 年 7 月 17 日,晚稻为福建省农科院研发的沁香优 212,为不育系所配优质杂交稻,生长周期为 2015 年 7 月 25 日—2015 年 11 月 7 日。早晚稻均为机插,水稻植株行间距为 14 cm×28 cm,施加的肥料类型主要为俄罗斯产复合肥(N:P₂O₅:K₂O=16%:16%:16%) 和尿素(46%N),底肥在移栽前一天施加(N:42 kg/hm²、P₂O₅:40 kg/hm²和 K₂O:40 kg/hm²),分蘖肥在移栽 1 周后施加(N:35 kg/hm²、P₂O₅:20 kg/hm²和 K₂O:20 kg/hm²),穗肥在 8 周后施加(N:18 kg/hm²、P₂O₅:10 kg/hm²和 K₂O:10 kg/hm²)。水稻生长期水分管理为水稻前期实行水淹管理,分蘖期后实行烤田-淹水-湿润灌溉相结合^[25]。

1.2 实验设计

本实验早、晚稻时期分别设置对照(Control, CK)、pH4.5、pH3.5 的酸雨处理组,每种处理设置 3 个重复样方,共 9 个小区。在小区设置上,每个小区面积 10 m²,小区随机排列,同时用田埂围护,并在田埂外圍区插入 0.5 cm 厚、30 cm 高的 PVC 板,每个小区之间的间隔约为 1 m,作为不同处理之间的缓冲区^[26]。对照处理组是指在自然条件下(没有通过人为喷淋酸雨),正常的田间水肥管理方式下种植的水稻样地。参照福州市酸雨成分配置酸雨原液,主要成分及含量分别是:K⁺(13.40 μmol/L)、Mg²⁺(24.09 μmol/L)、NH₄⁺(47.35 μmol/L)、Ca²⁺(72.97 μmol/L)、SO₄²⁻(76.35 μmol/L)、NO₃⁻(119.19 μmol/L)、Na⁺(147.96 μmol/L)、Cl⁻(159.44 μmol/L),并用 V(H₂SO₄):V(HNO₃)=1:1 混合液调酸雨 pH 值^[27],根据福州市历年年均酸沉降量计算出每次每个样方喷淋酸雨 450 mL,水稻移栽后每隔七天喷淋一次酸雨,酸雨喷洒采用喷雾法,均匀喷淋于样方中,直至水稻收割^[28]。

1.3 样品采集与测定

植物采集与测定:取样时距离上次喷淋酸雨均为 7 d,分别在早、晚稻拔节期(Jointing)(自移栽之后的第 50 d)、成熟期(Mature)(自移栽之后的第 92 d 与 106 d)将 CK、pH4.5、pH3.5 三组的每个采样点叶片进行采集,放入便携式冰箱中保存并迅速带回实验室。将叶片放入 70℃ 烘箱烘干至恒重后磨碎,过 100 目筛后放入自封袋中保存待用。TC、TN 含量采用 CHNOS 元素分析仪(Elemental Analyzer Vario EL III)测定;TP 采用 HClO₄-H₂SO₄法消煮,在连续流动分析仪(Skalar Analytical SAN++, Netherlands)测定。

土样采集与测定:用采土器采集 CK、pH4.5、pH3.5 三种处理共 9 个采样点犁耕层 0—15 cm 土壤,装入自封袋密封保存,带回实验室,挑去植物残体根系后,分成两份,一份放入 4℃ 冰箱冷藏待用,一份自然风干后装入自封袋保存待用。土温和电导率(Electrical Conductance, EC)采用便携式电导计(2265FS, USA)测定;土壤含水量用土壤水分测定仪(TDR 300, USA)测定;土壤 pH 值采用水土质量比为 2.5:1,振荡 30 min,静置后用便携式 pH 计(STARTER 300, USA)测定;土壤容重采用环刀法进行测定^[29];土壤中铁(Fe)采用邻菲罗啉比色法,在紫外可见分光光度计测定^[30]。

1.4 数据计算与处理

本实验原始数据均用 Microsoft Excel 2007 处理,用 Origin 8.6 作图,用 SPSS 20.0 进行分析;不同处理样地的植物 C、N、P 含量及其化学计量学特征等测定指标,均采用 Origin 8.6 软件作图,叶片 C/N、C/P、N/P 均为质量比,不同处理叶片 C、N、P 含量、及 C/N、C/P、N/P 的差异性检验采用 SPSS 20.0 的单因素方差分析。环境因子与 C、N、P 含量及 C/N、C/P、N/P 的相关性分析采用 SPSS 20.0 的 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 酸雨对叶片 C、N、P 含量的影响

酸雨影响下早稻叶片 C 含量在 341.92—404.52 g/kg 之间,且不同处理总体分布特征具有一致性(图 1),

拔节期与成熟期之间 C 含量具有显著差异 ($P < 0.05$), 与 CK 相比, pH4.5、pH3.5 处理均降低了早稻叶片在拔节期和成熟期的 C 含量, 在拔节期, 早稻 CK、pH4.5、pH3.5 处理 C 含量均值依次为 (404.52 ± 0.31)、(400.42 ± 0.30)、(398.28 ± 0.12) g/kg, 且早稻 pH4.5、pH3.5 处理的 C 含量与 CK 差异显著 ($P < 0.05$); 晚稻叶片 C 含量在 314.65—390.61 g/kg 之间, 且整体上各处理均显著低于同期早稻的 C 含量 ($P < 0.05$), 拔节期与成熟期之间 C 含量具有显著差异 ($P < 0.05$), 但同一时期各处理 C 含量差异不显著。

酸雨影响下早稻叶片 N 含量在 14.67—39.57 g/kg 之间, 且各处理均一定程度降低了叶片 N 含量, 各处理拔节期 N 含量均显著高于成熟期 ($P < 0.05$), 除拔节期 pH3.5 处理叶片 N 含量与其他处理差异显著之外 ($P < 0.05$), 其他处理均差异不显著 ($P < 0.05$); 晚稻叶片 N 含量在 7.52—29.10 g/kg 之间, 且整体上各处理均显著低于同期早稻的 N 含量 ($P < 0.05$), 拔节期与成熟期之间 N 含量具有显著差异 ($P < 0.05$), 但同一时期各处理 N 含量差异不显著。

酸雨影响下早稻叶片 P 含量在 0.48—0.94 g/kg 之间, 与 CK 相比, pH4.5、pH3.5 处理均显著降低了叶片在拔节期的 P 含量 ($P < 0.05$), 而在成熟期则差异不显著, 晚稻叶片 P 含量在 0.25—0.74 g/kg 之间, 除 pH4.5 处理显著增加了叶片在成熟期的 P 含量 ($P < 0.05$), 其他处理均差异不显著。

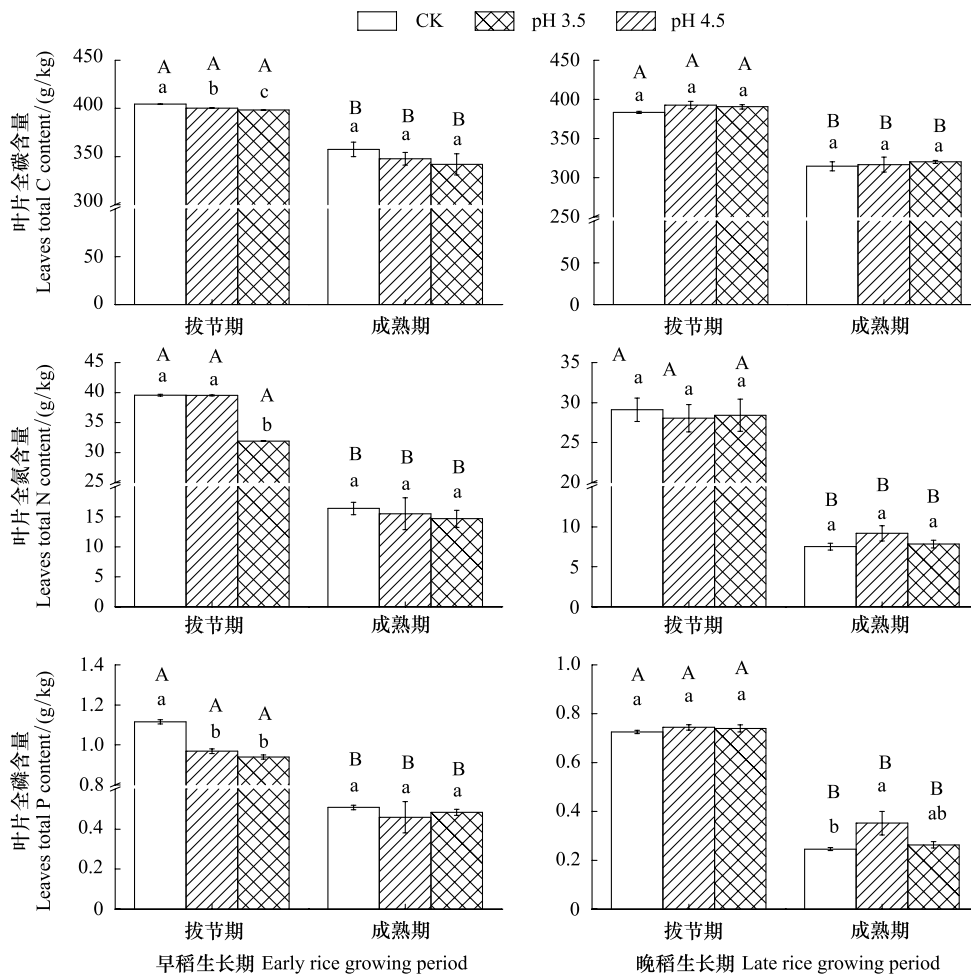


图 1 酸雨对早、晚稻叶片不同生长期全碳 (TC)、全氮 (TN) 和全磷 (TP) 含量的影响

Fig. 1 Effect of simulated acid rain on TC, TN and TP contents in various periods of early and late rice leaves

图中不同大写字母表示同一处理不同时期间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 叶片 C、N、P 含量的回归分析

本研究中, 研究 3 种元素的相关性发现, C、N、P 之间存在极显著相关关系 (图 2, $P < 0.01$), 从斜率上看,

C、N、P 元素之间均呈现良好的线性拟合的关系,其中 N 和 P 几乎是同步变化的,整体而言,N 与 P 元素变化较 C 快。

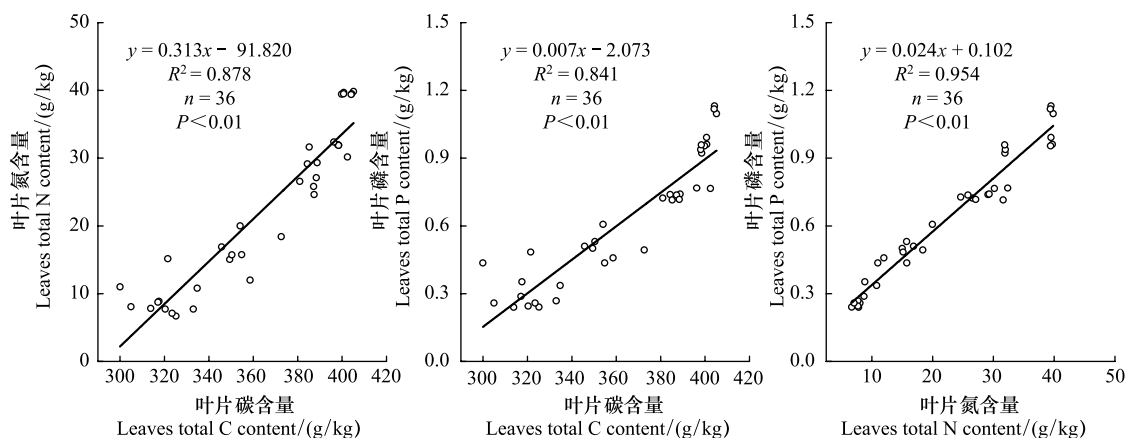


图 2 模拟酸雨下水稻叶片 C、N、P 线性拟合分析

Fig.2 Analysis of carbon, nitrogen and phosphorus in rice leaves under simulated acid rain

2.3 模拟酸雨对叶片 C、N、P 生态化学计量学特征的影响

酸雨影响下早稻叶片 C/N 在 10.13—23.88 之间,且拔节期 C/N 显著低于成熟期($P < 0.05$) (图 3),在拔节期,早稻 CK、pH4.5、pH3.5 处理 C/N 均值依次为 (10.22 ± 0.03) 、 (10.13 ± 0.02) 、 (12.48 ± 0.02) ,且早稻 pH4.5、pH3.5 处理的 C/N 与 CK 差异显著($P < 0.05$);晚稻叶片 C/N 在 13.24—42.23 之间,且整体上各处理均显著高于同期早稻的 C/N($P < 0.05$),拔节期与成熟期之间 C/N 具有显著差异($P < 0.05$),但同一时期各处理 C/N 差异不显著。

酸雨影响下早稻叶片 C/P 在 362.81—797.93 之间,且各处理均一定程度增加了叶片 C/P,各处理成熟期 C/P 均显著高于拔节期($P < 0.05$),在拔节期,早稻 CK、pH4.5、pH3.5 处理 C/P 均值依次为 (362.81 ± 3.52) 、 (413.89 ± 4.62) 、 (424.11 ± 4.78) ,且与 CK 相比,早稻 pH4.5、pH3.5 处理均显著提高了叶片的 C/P($P < 0.05$);晚稻叶片 C/P 在 527.66—1280.77 之间,且整体上各处理均显著高于同期早稻的 C/P($P < 0.05$),CK 与 pH3.5 处理拔节期与成熟期之间 C/P 具有显著差异($P < 0.05$),但同一时期各处理 C/P 无显著差异。

酸雨影响下早稻叶片 N/P 在 30.19—40.82 之间,与 CK 相比,pH4.5 处理均显著增加了叶片在拔节期的 N/P($P < 0.05$),而其他处理差异不显著,晚稻叶片 N/P 在 26.38—40.12 之间,各处理拔节期 N/P 显著高于成熟期($P < 0.05$),而同一时期各处理 N/P 无显著差异。如表 3 所示,在早、晚稻中,CK、pH4.5、pH3.5 处理叶片 C/N/P 均与时间存在极显著关系($P < 0.05$),即说明在水稻的不同生长期,叶片 C/N/P 的变化较为明显。

2.4 环境因子对早晚稻叶片 C、N、P 含量及其生态化学计量比的影响

在不同稻季,叶片 C、N、P 含量变化影响的环境因子具有一定的相似性,但差异也较为明显(表 1)。在早、晚稻时期,叶片 TC、TN、TP 含量与土温、含水量均呈极显著正相关关系($P < 0.01$),与土壤容重均呈极显著负相关关系($P < 0.01$),此外早稻叶片 TC 含量与 EC、pH 呈显著正相关关系($P < 0.05$),TN 含量与 pH 呈显著正相关关系($P < 0.05$),TP 含量与 pH 呈极显著正相关关系($P < 0.01$),晚稻叶片 TC、TP 含量与 EC 呈显著正相关关系($P < 0.05$),TN 含量与 EC、Fe 呈显著正相关关系($P < 0.05$)。

不仅早晚稻叶片 C、N、P 含量受环境因子影响,其内部 C/N、C/P、N/P 亦受多种因子的影响(表 2)。综合来看,早晚稻 TC、TN、TP 含量对叶片 C/N/P 有重要的影响,均存在极显著相关关系($P < 0.01$);早稻 C/N、C/P 与 pH 均呈显著负相关关系($P < 0.05$),而晚稻 C/N、C/P 与容重呈极显著正相关关系($P < 0.01$);早晚稻 C/N、C/P 与土温均呈极显著负相关关系($P < 0.01$),与含水量呈显著负相关关系($P < 0.05$),N/P 与土温均呈极显著正相关关系($P < 0.01$),综合来看叶片 C/N/P 与土温之间存在极显著正相关关系($P < 0.01$)。

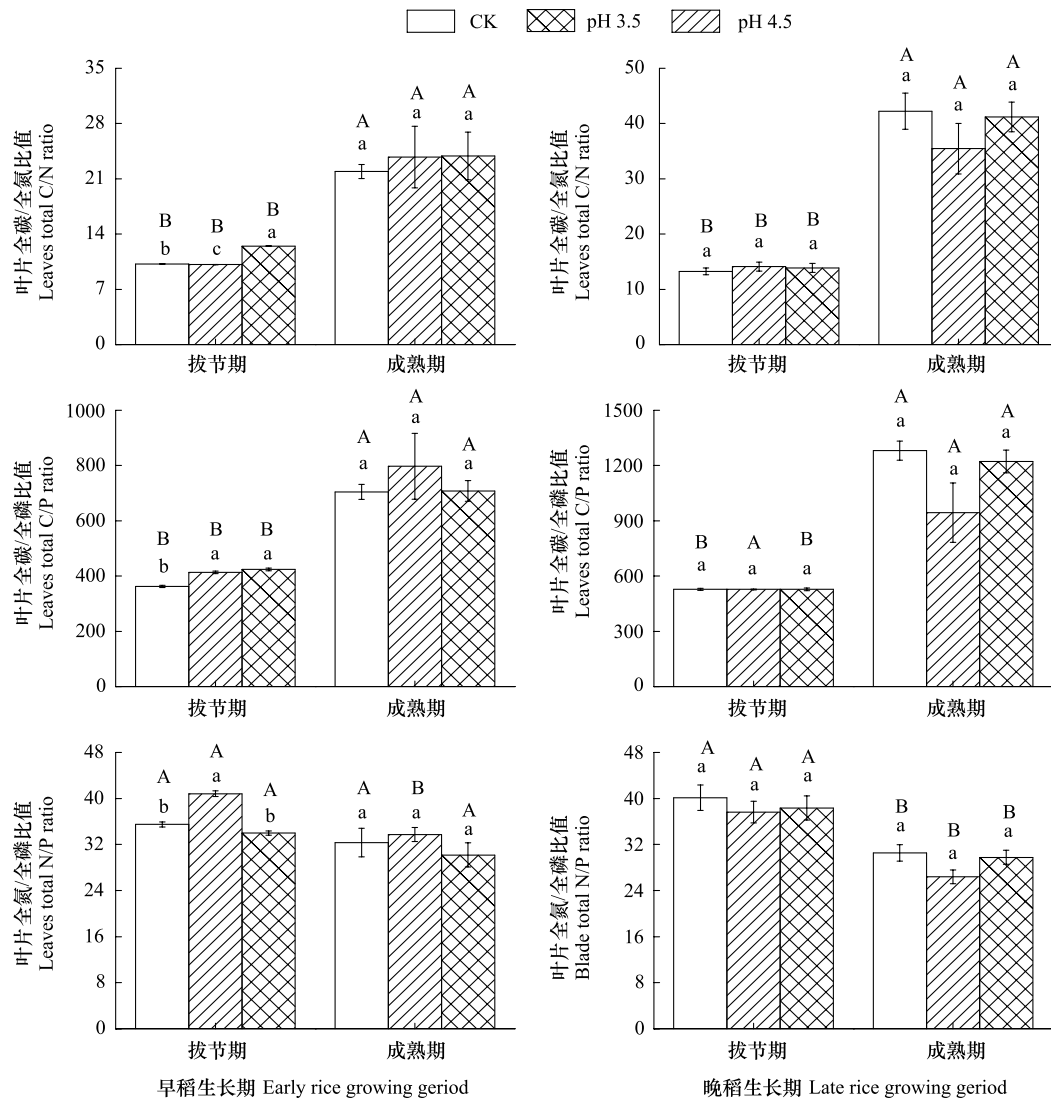


图3 酸雨对早、晚稻叶片不同生长期 C/N、C/P 和 N/P 的影响

Fig.3 Effect of simulated acid rain on C/N, C/P and N/P ratios in various periods of early and late rice leaves

图中不同大写字母表示同一处理不同时期差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

表1 早、晚稻叶片 C、N、P 含量与环境影响因子间的相关关系 ($n = 18$)

Table 1 Correlation between TC, TN and TP concentration and environmental influencing factors

生长期 Growth period	处理 Treat	指标 Index	土温 Soil temperature	EC	含水量 Water content	pH	容重 Bulk density	Fe
早稻	CK	TC	0.909*	-0.639	0.553	0.671	0.320	-0.095
		TN	0.963***	-0.671	0.587	0.784	0.288	-0.145
		TP	0.976***	-0.675	0.566	0.818*	0.235	-0.162
	pH4.5	TC	0.833*	0.806	0.937***	0.728	-0.989***	-0.566
		TN	0.876*	0.819*	0.937***	0.751	-0.973***	-0.591
		TP	0.861*	0.794	0.944***	0.709	-0.950***	-0.652
	pH3.5	TC	0.876*	0.801	0.886*	0.565	-0.934***	-0.135
		TN	0.988***	0.788	0.984***	0.612	-0.689	-0.275
		TP	0.991***	0.837*	0.982***	0.563	-0.739	-0.323

续表

生长期 Growth period	处理 Treat	指标 Index	土温 Soil temperature	EC	含水量 Water content	pH	容重 Bulk density	Fe
晚稻 Late rice	CK	TC	0.983 ***	0.466	0.826 *	0.515	-0.957 *	0.222
		TN	0.990 ***	0.576	0.917 *	0.664	-0.945 ***	0.406
		TP	0.999 ***	0.489	0.906 *	0.651	-0.971 ***	0.391
	pH4.5	TC	0.966 ***	0.786	0.922 ***	0.230	-0.733	0.582
		TN	0.977 ***	0.702	0.780	0.531	-0.614	0.734
		TP	0.966 ***	0.597	0.695	0.658	-0.624	0.840 *
pH3.5	TC	0.995 ***	0.767	0.961 ***	0.869 *	-0.945 ***	0.477	
	TN	0.982 ***	0.793	0.935 ***	0.836 *	-0.904 *	0.530	
	TP	0.997 ***	0.770	0.977 ***	0.829 *	-0.915 *	0.468	
早稻 Early rice	综合	TC	0.858 ***	0.551 *	0.748 ***	0.577 *	-0.792 ***	-0.265
		TN	0.904 ***	0.436	0.735 ***	0.581 *	-0.629 ***	-0.322
		TP	0.884 ***	0.448	0.757 ***	0.615 ***	-0.616 ***	-0.370
晚稻 Late rice	综合	TC	0.975 ***	0.590 *	0.862 ***	0.218	-0.783 ***	0.344
		TN	0.982 ***	0.549 *	0.831 ***	0.367	-0.752 ***	0.470 *
		TP	0.979 ***	0.500 *	0.824 ***	0.317	-0.779 ***	0.419
全年 Annual	综合	TC	0.715 ***	0.578 ***	0.512 ***	0.311	-0.803 ***	0.010
		TN	0.689 ***	0.513 ***	0.490 ***	0.407 *	-0.728 ***	-0.020
		TP	0.723 ***	0.500 ***	0.441 ***	0.379 *	-0.739 ***	-0.093

CK;对照处理 Control;EC:电导率 Electrical conductance;TC;全碳 Total carbon;TN:全氮 Total nitrogen;TP 全磷 Total phosphorus; * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关;*** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关

表 2 C/N、C/P 和 N/P 与早、晚稻叶片 C、N、P 含量及环境影响因子间的相关关系 (n=18)

Table 2 Correlation between C/N, C/P and N/P ratios, and TC, TN and TP concentration, environmental influencing factors

生长期 Growth period	处理 Treat	指标 Index	TC	TN	TP	土温 Soil temperature	EC	含水量 Water content	pH	容重 Bulk density	Fe
早稻 Early rice	CK	C/N	-0.990 ***	-0.998 ***	-0.985 ***	-0.951 ***	0.682	-0.573	-0.745	-0.272	0.122
		C/P	-0.896 *	-0.972 ***	-0.992 ***	-0.966 ***	0.686	-0.567	-0.839 *	-0.194	0.175
		N/P	0.763	0.603	0.506	0.458	-0.349	0.369	0.166	0.410	0.061
	pH4.5	C/N	-0.953 ***	-0.954 ***	-0.968 ***	-0.716	-0.672	-0.965 ***	-0.521	0.921 ***	0.759
		C/P	-0.928 ***	-0.943 ***	-0.967 ***	-0.730	-0.662	-0.953 ***	-0.511	0.884 *	0.793
		N/P	0.963 ***	0.932 ***	0.894 *	0.765	0.772	0.873 *	0.721	-0.983 ***	-0.414
	pH3.5	C/N	-0.702	-0.945 ***	-0.908 *	-0.931 ***	-0.616	-0.909 *	-0.652	0.447	0.253
		C/P	-0.826 *	-0.991 ***	-0.978 ***	-0.987 ***	-0.775	-0.974 ***	-0.571	0.594	0.346
		N/P	0.470	0.778	0.705	0.736	0.298	0.724	0.743	-0.216	0.003
晚稻 Late rice	CK	C/N	-0.926 ***	-0.979 ***	-0.977 ***	-0.976 ***	-0.573	-0.960 ***	-0.792	0.937 ***	-0.556
		C/P	-0.954 ***	-0.984 ***	-0.994 ***	-0.992 ***	-0.489	-0.934 ***	-0.711	0.953 ***	-0.488
		N/P	0.846 *	0.931 ***	0.872 *	0.879 *	0.762	0.897 *	0.750	-0.808	0.507
	pH4.5	C/N	-0.791	-0.948 ***	-0.985 ***	-0.911 *	-0.508	-0.576	-0.768	0.537	-0.870 *
		C/P	-0.615	-0.833 *	-0.912 *	-0.783	-0.336	-0.383	-0.903 *	0.380	-0.914 *
		N/P	0.955 ***	0.950 ***	0.873 *	0.931 ***	0.808	0.865 *	0.261	-0.614	0.504
	pH3.5	C/N	-0.970 ***	-0.981 ***	-0.987 ***	-0.982 ***	-0.767	-0.963 ***	-0.792	0.840 *	-0.439
		C/P	-0.974 ***	-0.974 ***	-0.992 ***	-0.985 ***	-0.723	-0.982 ***	-0.757	0.866 *	-0.410
		N/P	0.891 *	0.940 ***	0.885 *	0.875 *	0.805	0.777	0.814 *	-0.769	0.587
早稻 Early rice	综合	C/N	-0.867 ***	-0.954 ***	-0.937 ***	-0.833 ***	-0.403	-0.788 ***	-0.519 *	0.569 *	0.434
		C/P	-0.859 ***	-0.931 ***	-0.960 ***	-0.798 ***	-0.423	-0.826 ***	-0.545 *	-0.583 *	0.529 *

续表

生长期 Growth period	处理 Treat	指标 Index	TC	TN	TP	土温 Soil temperature	EC	含水量 Water content	pH	容重 Bulk density	Fe
晚稻 Late rice	综合	N/P	0.622 ***	0.716 ***	0.560 *	0.649 ***	0.244	0.414	0.259	-0.423	-0.039
		C/N	-0.884 ***	-0.976 ***	-0.982 ***	-0.950 ***	-0.483 *	-0.808 ***	-0.378	0.730 ***	-0.472 *
		C/P	-0.833 ***	-0.921 ***	-0.967 ***	-0.902 ***	-0.403	-0.759 ***	-0.294	0.731 ***	-0.377
全年 Annual	综合	N/P	0.858 ***	0.902 ***	0.807 ***	0.867 ***	0.591 ***	0.749 ***	0.473 *	-0.583 *	0.562 *
		C/N	-0.879 ***	-0.913 ***	-0.906 ***	-0.793 ***	-0.450 ***	-0.403 *	-0.346 *	0.693 ***	-0.059
		C/P	-0.848 ***	-0.890 ***	-0.917 ***	-0.785 ***	-0.422 *	-0.378 *	-0.297	0.705 ***	0.039
		N/P	0.755 ***	0.774 ***	0.635 ***	0.477 ***	0.418 *	0.471 ***	0.392 *	-0.489 ***	0.104

* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关;*** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关

3 讨论

3.1 模拟酸雨对水稻叶片 C、N、P 含量的影响

C、N、P 作为影响植物正常生长发育所必需的养分元素,在植物生长和繁殖过程中发挥着重要的作用,其含量的多少及成分组合状况,可从侧面反映出水稻生长和养分利用状况,并将会直接影响水稻的产量^[8,31]。已有研究表明,当酸雨 pH 小于 4 时,植物将更难以吸收土壤中的镁、钙、磷、可溶性氮等营养元素,导致营养不足,最终影响植物叶片数量和形态结构^[32]。在本研究中,早稻 pH3.5 处理显著降低了叶片的 C、N 和 P 含量,这可能是因为 C 是构成植物体干物质最主要的元素^[2],酸雨的施加抑制了植物体内可溶性糖的积累以及淀粉合成酶的产生,进而降低植物的 C 代谢^[33]。此外,除遗传因素之外,植物体 N 含量主要是受土壤养分供应的影响^[34-35],而酸雨的施加可显著降低土壤养分供应和酶活性,导致土壤 N 净矿化速率的降低,从而使土壤 N 的供给降低^[14]。再者,P 是作物生长和发育所必需的同时也是重要的限制性因子^[36],水稻在生长过程中需要充足的养分供给,而酸雨中含有大量的 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 离子,酸雨的施加会导致土壤溶液中 NH_4^+ 的含量增加,这不利于植物对 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等的吸收,导致植物光合作用降低^[37],而 P 则是叶片产生光合酶的重要组成部分,因此叶片中的 P 含量呈现出显著降低趋势^[10]。在本研究中,酸雨对早晚稻叶片在成熟期的影响十分有限,整体并无显著差异,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^[38-39],即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以抵消土壤中该养分的淋失,而当土壤中某种必需元素含量较高时,植物会被迫吸收一定数量以增加植物中该养分的含量,以此维持植物的正常生长^[9,40]。以 N 为例,酸雨可影响植物 N 代谢关键酶活性以及氨基酸的合成,使部分 N 代谢酶活性降低,影响作物对 N 营养元素的同化和吸收^[41],同时这也迫使植物最大限度的吸收土壤中的 N 元素,并以养分库形式抵抗酸雨的影响。本研究中,在酸雨影响下,早晚稻叶片在拔节期 C、N、P 含量呈现出不同的变化特征,晚稻受酸雨影响程度显著低于早稻,这可能是早稻品种为禾盛 10,属于中熟常规早粳,耐肥力较强,但抗性一般^[42],而晚稻品种为沁香系列,是一种优质水稻,败育彻底,可恢复性强^[43]。此外,温度与叶片的 C、N 和 P 含量也显著相关(表 1),在本研究中,晚稻拔节期温度显著高于早稻,随着温度升高,可提高土壤微生物的活性,加快植物对有机质的积累,提高植物 C 的含量^[44],同时可加快微生物从有机物质中分解 N 的速率,进而提高植物中可利用氮的含量^[45];此外,温度的增加可以提高土壤的磷酸酶活性,进而强化植物对 P 的吸收^[46];这也与“温度-植物生理学”假说^[47]相符,即低温能降低植物的光合作用效率及对 N、P 等养分元素的吸收与利用。

在本研究中,不同处理早晚稻叶片拔节期 C、N 和 P 含量均显著高于成熟期,这可能是受施肥、灌溉、田间管理等众多因素的影响^[11,48],在拔节期,水分较充足,加上部分肥料的施加,水稻生长旺盛,叶片光合作用增强,生物量增加,而在成熟期,叶片开始衰老,养分随之转移,此时田间水量较少,P 等元素大量附着于土壤之中,降低了植物对营养元素的吸收^[11,49]。

3.2 模拟酸雨下水稻叶片 C、N、P 生态化学计量学特征及其指示作用

根据“动态平衡理论”^[50],化学计量学理论认为有机体能够通过控制自身的养分元素平衡使其与外界环境的营养元素供给保持动态平衡状态,这说明有机体中存在一个相对稳定的 C、N、P 元素比值关系,并且其中任何一种元素的巨大变化都将使之相关的比值发生变化^[9,51]。因此,通过 C/N/P 的变化,可以用来判断限制植物生长、发育或繁殖的元素类型^[7]。有研究表明当湿地植物叶 N/P < 14 时存在 N 限制,叶 N/P > 16 时存在 P 限制,叶 14 < N/P < 16 时存在 N、P 共同限制^[52],在本研究中,早晚稻在拔节期 N/P 均高于成熟期,且各处理之间叶的 N/P 值均大于 16,说明此时水稻存在 P 限制,这也与 Han 等^[53]通过研究我国 753 个不同植物叶片 N、P 特征,发现我国植物生长主要受到 P 限制的结论一致。王晶苑等^[54]通过研究四种植物的化学计量比特征,得出低纬度地区植物易受 P 限制也从侧面证实了这一点。根据植物应对酸雨处理后土壤养分供应缺乏的策略^[38-39],水稻在应对土壤 N、P 供应不足时,会更多地吸收 P,因此在水稻生长的过程中,尤其是在拔节期需要追施适量的磷肥。此外,除 pH4.5 处理增大了早稻叶 N/P,其他处理均降低了早晚稻叶片 N/P,但处理间差异不显著,说明水稻叶片 N、P 含量对酸雨处理响应存在差异,整体上适量酸雨处理可降低 N/P,一定程度上降低了 P 对植物生长的限制,但同时增加了植物的 N 需求,影响水稻器官 N、P 含量平衡^[9,14]。C 与 N 代谢作为植物最基本的代谢途径,是植物生长发育的重要物质基础,一定程度上可决定水稻产量^[55],本研究中,早稻拔节期、成熟期叶片的 C/N 均低于同时期晚稻,表明早稻较晚稻而言,C、N 更加协调,养分利用效率更高。C/P 是植物生长速率的重要指标,本研究中,酸雨处理显著增加了早稻叶片在拔节期的 C/P,而在成熟期则差异不显著,这可能是水稻采取的重要生活史策略^[1],在拔节期,水稻为了增强对酸雨的抵抗能力,提高了叶片的 C 分配,叶片 C/P 增加,使酸雨处理水稻生长速率显著低于 CK;而在成熟期,在水稻对酸雨长期适应而产生的应对策略作用下,水稻受酸雨胁迫作用逐步降低,减少了叶片的 C 分配,叶片 C/P 降低,使酸雨处理水稻生长速率与 CK 差异不显著。本研究中,酸雨影响下,早、晚稻叶片各处理不同生长期之间 C/N/P 差异较大,说明早、晚稻的养分利用效率存在差异,这可能与植株内部差异,温度,生长周期,降水量以及人类干扰等多种因子有关^[47,56]。酸雨施加后对早晚稻各处理叶片 C、N、P 元素有不同影响,但无明显变化规律,说明外源施加物变化对植物 C、N、P 元素特征变化的影响较为复杂,仍需进一步开展更为深入的研究。

4 结论

(1)在本研究中,早晚稻叶片不同时期的 C、N、P 含量均呈现出一定的变化规律。早稻叶片 C、N、P 含量均高于晚稻,且早晚稻叶片不同处理拔节期 C、N、P 含量均显著高于成熟期。酸雨是影响福州水稻叶片 C、N、P 含量及其生态化学计量比的重要因子,随着酸雨浓度的增加,早稻叶片 C、N、P 含量呈下降趋势,且在拔节期有显著差异,成熟期则无显著差异,这可能是水稻应对养分供应缺乏的策略之一,较长时间的适应使叶片形成了对酸雨一定的的抵御能力。晚稻叶片受酸雨影响小于早稻,这可能和水稻“温度-植物生理学”假说有关,高温在一定程度上抵消了酸雨对叶片养分含量的不利影响,酸雨处理对叶片 C、N、P 含量的影响具有波动性。

(2)在酸雨作用下,水稻叶片 C、N、P 元素之间均呈现良好的线性拟合关系,其中 N 和 P 几乎是同步变化的。模拟酸雨并未改变水稻养分限制状况,但可一定程度上降低 N/P,影响水稻 N、P 含量平衡。此外,早晚稻在不同时期均处于 P 限制状态,因此在水稻生长的过程中,尤其是在拔节期需要追施适量的磷肥。

参考文献 (References):

- [1] 王凯博,上官周平. 黄土丘陵区燕沟流域典型植物叶片 C、N、P 化学计量特征季节变化. 生态学报, 2011, 31(17): 4985-4991.
- [2] Ågren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities. Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics, 2008, 39: 153-170.
- [3] 卢同平,史正涛,牛洁,张文翔. 我国陆生生态化学计量学应用研究进展与展望. 土壤, 2016, 48(1): 29-35.
- [4] 陈改革,朱建国,庞静,程磊,谢祖彬,曾青. CO₂浓度升高对水稻抽穗期根系有关性状及根碳氮比的影响. 中国水稻科学, 2006, 20(1): 53-57.
- [5] Sun X M, Yu K L, Shugart H H, Wang G. Species richness loss after nutrient addition as affected by N:C ratios and phytohormone GA₃ contents in

- an alpine meadow community. *Journal of Plant Ecology*, 2016, 9(2): 201-211.
- [6] Xie H T, Yu M K, Cheng X R. Leaf non-structural carbohydrate allocation and C:N:P stoichiometry in response to light acclimation in seedlings of two subtropical shade-tolerant tree species. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 124: 146-154.
- [7] Drenovsky R E, Richards J H. Low leaf N and P resorption contributes to nutrient limitation in two desert shrubs. *Plant Ecology*, 2006, 183(2): 305-314.
- [8] 唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水. CO₂倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征. *环境科学*, 2018, 39(12): 5708-5716.
- [9] 张宇飞, 方向民, 陈伏生, 宗莹莹, 顾菡娇, 胡小飞. 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. *应用生态学报*, 2017, 28(4): 1309-1316.
- [10] 李瑞瑞, 卢艺, 王益明, 万福绪. 墨西哥柏人工林土壤-叶片碳氮磷化学计量特征对不同施N量的响应. *内蒙古农业大学学报: 自然科学版*, 2018, 39(6): 26-32.
- [11] Ye Y S, Liang X Q, Chen Y X, Li L, Ji Y J, Zhu C Y. Carbon, nitrogen and phosphorus accumulation and partitioning, and C:N:P stoichiometry in late-season rice under different water and nitrogen managements. *PLoS One*, 2014, 9(7): e101776.
- [12] 张藤子, 李亚楠, 韩飞燕, 张淞著, 周永斌. 辽西两种油松混交林土壤及油松叶片 C:N:P 化学计量特征. *生态学杂志*, 2018, 37(10): 3061-3067.
- [13] Minden V, Kleyer M. Internal and external regulation of plant organ stoichiometry. *Plant Biology*, 2014, 16(5): 897-907.
- [14] 陈希, 陈伏生, 叶素琼, 喻苏琴, 方向民, 胡小飞. 丘陵红壤茶园根际氮磷转化对不同强度酸雨胁迫的响应. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 1-8.
- [15] 张华, 杨永奎, 谢德体, 王定勇. 酸雨对紫色土氮磷淋失的影响. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 22-25.
- [16] 郑跃芳, 钟全林, 程栋梁, 张中瑞, 邓兴宇. 亚热带 4 种林木幼苗的碳氮磷含量及其化学计量比特征. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(2): 379-383.
- [17] Velikova V, Yordanov I, Edreva A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants; protective role of exogenous polyamines. *Plant Science*, 2000, 151(1): 59-66.
- [18] Wu J P, Liang G H, Hui D F, Deng Q, Xiong X, Qiu Q Y, Liu J X, Chu G W, Zhou G Y, Zhang D Q. Prolonged acid rain facilitates soil organic carbon accumulation in a mature forest in southern China. *Science of the Total Environment*, 2016, 544: 94-102.
- [19] 陈彬彬, 王宏, 郑秋萍, 杨凯. 福建省区域酸雨特征及成因分析. *气象与环境学报*, 2016, 32(4): 70-76.
- [20] 刘莉, 杨丽军, 白颖艳, 程永毅, 李忠意. 土壤酸化的研究进展. *贵州农业科学*, 2017, 45(10): 83-87.
- [21] 唐黎, 林永慧, 何兴兵. 杉木和香樟酸雨酸解底物的分解格局. *生态学报*, 2017, 37(18): 6038-6052.
- [22] Polishchuk O V, Vodka M V, Belyavskaya N A, Khomochkin A P, Zolotareva E K. The effect of acid rain on ultrastructure and functional parameters of photosynthetic apparatus in pea leaves. *Cell and Tissue Biology*, 2016, 10(3): 250-257.
- [23] Sun Z G, Wang L H, Chen M M, Wang L, Liang C J, Zhou Q, Huang X H. Interactive effects of cadmium and acid rain on photosynthetic light reaction in soybean seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 79: 62-68.
- [24] Dolatabadian A, Sanavy S A M M, Gholamhoseini M, Joghian A K, Majidi M, Kashkooli A B. The role of calcium in improving photosynthesis and related physiological and biochemical attributes of spring wheat subjected to simulated acid rain. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2013, 19(2): 189-198.
- [25] 朱秋丽, 曾冬萍, 王纯, 全川, 王维奇. 废弃物施加对福州平原稻田土壤团聚体分布及其稳定性的影响. *环境科学学报*, 2016, 36(8): 3000-3008.
- [26] Wang C, Wang W Q, Sardans J, An W L, Zeng C S, Abid A A, Peñuelas J. Effect of simulated acid rain on CO₂, CH₄ and N₂O fluxes and rice productivity in a subtropical Chinese paddy field. *Environmental Pollution*, 2018, 243: 1196-1205.
- [27] 安婉丽, 曾从盛, 王维奇. 模拟酸雨对福州平原水稻田温室气体排放的影响. *环境科学学报*, 2017, 37(10): 3984-3994.
- [28] 陈晓旋, 安婉丽, 陈优阳, 刘旭阳, 金强, 王维奇. 模拟酸雨对福州平原水稻田土壤化学结合态有机碳含量的影响. *环境科学学报*, 2018, 38(12): 4796-4804.
- [29] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [30] Kostka J E, Luther III G W. Partitioning and speciation of solid phase iron in saltmarsh sediments. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(7): 1701-1710.
- [31] 马永跃, 王维奇. 闽江河口区稻田土壤和植物的 C、N、P 含量及其生态化学计量比. *亚热带农业研究*, 2011, 7(3): 182-187.
- [32] Du Y J, Wei M L, Reddy KR, Liu Z P, Jin F. Effect of acid rain pH on leaching behavior of cement stabilized lead-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 271: 131-140.
- [33] 王小东, 汪俊宇, 周欢欢, 傅卢成, 王彬, 张汝民, 高岩. 模拟酸雨高温胁迫对桂花品种‘杭州黄’抗氧化酶活性和非结构性碳代谢的影响. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(1): 54-61.
- [34] Chen F S, Niklas K J, Liu Y, Fang X M, Wan S Z, Wang H M. Nitrogen and Phosphorus additions alter nutrient dynamics but not resorption efficiencies of Chinese fir leaves and twigs differing in age. *Tree Physiology*, 2015, 35(10): 1106-1117.
- [35] 靖磊, 周延, 吕偲, 赵君茹, 雷光春. 洞庭湖湿地 3 个林龄杨树人工林叶与土壤碳氮磷生态化学计量特征. *生态学报*, 2018, 38(18): 6530-6538.

- [36] Seyhan D. Country-scale phosphorus balancing as a base for resources conservation. *Resources, Conservation and Recycling*, 2009, 53(12): 698-709.
- [37] Lu X K, Mao Q G, Gilliam F S, Luo Y Q, Mo J M. Nitrogen deposition contributes to soil acidification in tropical ecosystems. *Global Change Biology*, 2014, 20(12): 3790-3801.
- [38] 刘可慧, 彭少麟, 莫江明, 黄忠良, 方运霆. 酸沉降对森林植物影响过程和机理. *生态环境*, 2005, 14(6): 953-960.
- [39] 吴迪, 张蕊, 高升华, 付晓, 邓红兵, 邵国凡, 张旭东. 模拟氮沉降对长江中下游滩地杨树林土壤呼吸各组分的影响. *生态学报*, 2015, 35(3): 717-724.
- [40] Hu X F, Wu A Q, Wang F C, Chen F S. The effects of simulated acid rain on internal nutrient cycling and the ratios of Mg, Al, Ca, N, and P in tea plants of a subtropical plantation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191(2): 99.
- [41] 张寒, 胡正华, 陈书涛, 胡冰冰, 盛露, 孙银. 模拟酸雨对大豆田土壤 N₂O 通量及植株和土壤氮含量的影响. *生态环境学报*, 2017, 26(4): 590-596.
- [42] 薛凌英, 林丽萱, 董利平. 禾盛 10 号高产栽培技术浅析. *农技服务*, 2016, 33(8): 91-91, 93-93.
- [43] 郭爱军, 蒋小勇, 蒋逊平, 谢晓阳, 陈镇宏, 李再强. 水稻优质不育系沁香 A 的选育. *杂交水稻*, 2009, 24(6): 13-14.
- [44] Welker J M, Fahnestock J T, Sullivan P F, Chimner R A. Leaf mineral nutrition of arctic plants in response to warming and deeper snow in northern Alaska. *Oikos*, 2005, 109(1): 167-177.
- [45] Niu S L, Sherry R A, Zhou X H, Wan S Q, Luo Y Q. Nitrogen regulation of the climate-carbon feedback: evidence from a long-term global change experiment. *Ecology*, 2010, 91(11): 3261-3273.
- [46] Sardans J, Peñuelas J, Estiarte M. Warming and drought alter soil phosphatase activity and soil P availability in a Mediterranean shrubland. *Plant and Soil*, 2006, 289(1/2): 227-238.
- [47] Li Z Q, Yang L, Lu W, Gong W, Gong X S, Xu J, Yu D. Spatial patterns of leaf carbon, nitrogen stoichiometry and stable carbon isotope composition of *Ranunculus natans* C.A. Mey. (Ranunculaceae) in the arid zone of northwest China. *Ecological Engineering*, 2015, 77: 9-17.
- [48] Mahajan G, Chauhan BS, Timsina J, Singh P P, Singh K. Crop performance and water- and nitrogen-use efficiencies in dry-seeded rice in response to irrigation and fertilizer amounts in northwest India. *Field Crops Research*, 2012, 134: 59-70.
- [49] Haynes R J, Swift R S. The effects of pH and drying on adsorption of phosphate by aluminium-organic matter associations. *Journal of Soil Science*, 1989, 40(4): 773-781.
- [50] Koojiman S A L M. The stoichiometry of animal energetics. *Journal of Theoretical Biology*, 1995, 177(2): 139-149.
- [51] Delgado-Baquerizo M, Maestre F T, Gallardo A, Bowker M A, Wallenstein M D, Quero J U, Ochoa V, Gozalo B, García-Gómez M, Soliveres S, García-Palacios P, Berdugo M, Valencia E, Escolar C, Arredondo T, Barraza-Zepeda C, Bran D, Carreira J A, Chaieb M, Conceição A A, Derak M, Eldridge D J, Escudero A, Espinosa C I, Gaitán J, Gatica M G, Gómez-González S, Guzman E, Gutiérrez J R, Florentino A, Hepper E, Hernández R M, Huber-Sannwald E, Jankju M, Liu J S, Mau R L, Miriti M, Moneris J, Naseri K, Noumi Z, Polo V, Prina A, Pucheta E, Ramírez E, Ramírez-Collantes D A, Romão R, Tighe M, Torres D, Torres-Díaz C, Ungar E D, Val J, Wamiti W, Wang D L, Zaady E. Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands. *Nature*, 2013, 502(7473): 672-689.
- [52] Güsewell S, Koerselman W, Verhoeven J T A. Biomass N:P ratios as indicators of nutrient limitation for plant populations in wetlands. *Ecological Applications*, 2003, 13(2): 372-384.
- [53] 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.
- [54] 王晶苑, 王绍强, 李纫兰, 闫俊华, 沙丽清, 韩士杰. 中国四种森林类型主要优势植物的 C:N:P 化学计量学特征. *植物生态学报*, 2011, 35(6): 587-595.
- [55] 阳剑, 时亚文, 李宙炜, 陶优生, 唐启源. 水稻碳氮代谢研究进展. *作物研究*, 2011, 25(4): 383-387.
- [56] Hagos H, Ndemo E, Yosuf J. Factors affecting adoption of upland rice in Tselemti district, northern Ethiopia. *Agriculture & Food Security*, 2018, 7(1): 59.