

# 模拟酸雨对福州平原水稻田土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征影响

刘旭阳<sup>1</sup>, 安婉丽<sup>1</sup>, 金强<sup>1</sup>, 陈晓旋<sup>1</sup>, 陈伏阳<sup>1</sup>, 王维奇<sup>1,2</sup>

(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:** 为阐明酸雨对水稻田土壤碳(TC)、氮(TN)、磷(TP)含量及其生态化学计量学特征影响,以福州平原水稻田为研究对象,在早稻和晚稻生长期中,设置对照(CK)、模拟酸雨(pH为2.5,3.5,4.5)处理,对酸雨影响下福州平原水稻田土壤TC、TN和TP含量进行了测定与分析。结果表明:综合早稻和晚稻生长期来看,酸雨处理下土壤TC、TN和TP含量均值均大于CK组( $P < 0.05$ ),水稻成熟期各处理土壤TC含量均值均小于返青期和拔节期( $P < 0.01$ ),水稻拔节期各处理土壤TN含量均值均小于返青期和成熟期( $P < 0.01$ ),水稻成熟期各处理土壤TP含量均值均小于返青期和拔节期( $P < 0.01$ );整个生长期中,酸雨处理下土壤C/N、C/P和N/P的变化范围分别在7.87~10.86,8.38~9.91,0.82~1.26,早稻各生长期酸雨处理下土壤C/N、C/P和N/P均小于CK组( $P < 0.05$ );与早稻相比,晚稻N/P有显著下降,且C/N、C/P和N/P在返青期均大于CK组( $P < 0.05$ );早、晚稻拔节期各处理土壤C/N均大于返青期和成熟期( $P < 0.01$ );早、晚稻各生长期中C/P差异不显著;早、晚稻拔节期各处理土壤N/P均小于返青期和成熟期( $P < 0.01$ )。总体来看,酸雨处理提高了稻田土壤各生长期土壤碳、氮、磷含量,且稻田土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征受酸雨影响显著,并具有较为明显的生长期变化。

**关键词:** 碳、氮、磷;生态化学计量学;酸雨;水稻田;福州平原

中图分类号:X17

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2019)03-0199-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.03.030

## Effects of Simulated Acid Rain on Soil Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Contents and Ecological Stoichiometry Characteristics of Paddy Field in Fuzhou Plain

LIU Xuyang<sup>1</sup>, AN Wanli<sup>1</sup>, JIN Qiang<sup>1</sup>, CHEN Xiaoxuan<sup>1</sup>, CHEN Youyang<sup>1</sup>, WANG Weiqi<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 2. Key Laboratory of Humid

Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

**Abstract:** In order to clarify the effect of acid rain on soil carbon (TC), nitrogen (TN), phosphorus (TP) content, and ecological stoichiometry characteristics, taking the paddy field in Fuzhou Plain as the research object, setting the control (CK), simulated acid rain (pH 2.5, 3.5, 4.5) treatment in the early rice and late rice growth period, the TC, TN and TP contents in paddy soil of Fuzhou Plain were measured and analyzed under the influence of acid rain. The results showed that the TC, TN, and TP contents in the soil under the acid rain treatments were higher than those in the CK ( $P < 0.05$ ). The average TC content in the soil at the maturity stage was lower than that at the greening stage and the jointing stage ( $P < 0.01$ ). The average TN content of each treatment in soil at the jointing stage of rice was less than that at the regreening stage and maturity stage ( $P < 0.01$ ). The average soil TP content at maturity stage was less than that at regreening stage and jointing stage ( $P < 0.01$ ). During the whole growth period, the C/N, C/P, and N/P ratios in the soil under acid rain treatment ranged from 7.87 ~ 10.86, 8.38 ~ 9.91 and 0.82 ~ 1.26, respectively. The C/N, C/P, and N/P ratios were smaller than that of the CK ( $P < 0.05$ ). Compared with early rice, the N/P

收稿日期:2018-12-19

资助项目: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育计划项目(2017)

第一作者:刘旭阳(1994-),男,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事生态与环境研究。E-mail:lesliexyang@163.com

通信作者:王维奇(1982-),男,辽宁沈阳人,副研究员,主要从事生态与环境研究。E-mail:wangweiqi@fjnu.edu.cn

ratio of late paddy decreased significantly, and the C/N, C/P, and N/P ratios were higher at the regreening stage than in the CK ( $P < 0.05$ ). The C/N ratio at jointing stage was higher than that at regreening and maturity stages ( $P < 0.01$ ). The difference of C/P ratio was not significant during the growth periods of early and late rice. The N/P ratio of each treatment at jointing stage of early and late rice was lower than that at regreening and maturity stages ( $P < 0.01$ ). In general, acid rain treatment increased soil carbon, nitrogen, and phosphorus contents in paddy soils, and the ecological stoichiometry characteristics in paddy soils was also significantly affected by acid rain, moreover, appeared obviously growth period variation.

**Keywords:** carbon; nitrogen; phosphorus; ecological stoichiometry; acid rain; paddy field; Fuzhou Plain

从 20 世纪 70 年代开始,酸雨已成为当今世界最严重的环境问题之一<sup>[1]</sup>。目前我国已经成为了世界第三大酸雨区,我国受酸雨污染较为严重,国土面积的 40% 受酸雨危害,尤其南方<sup>[2]</sup>。福建近年频发酸雨,降水 pH 大多在 4.5 以下,而降水 pH 为 3.0 的极端情况也不鲜见<sup>[3]</sup>,酸雨会阻碍水稻叶绿素的合成,使水稻的光合作用减弱,一定程度上抑制水稻的正常生长,造成水稻的减产<sup>[4]</sup>。因此,进一步深入研究稻田生态系统如何响应酸雨值得研究。

土壤的结构和理化性质经过酸雨淋溶后会受到影响而发生改变,导致土壤酸化,加快土壤表层盐基离子的淋溶速度,降低土壤肥力,从而使农作物减产<sup>[5]</sup>。近年来模拟酸雨对碳、氮、磷或生态化学计量学特征的研究主要侧重于森林土壤和植物器官化学计量比,梁国华等<sup>[6]</sup>研究了鼎湖山季风常绿阔叶林土壤对模拟酸雨的响应,张宇飞等<sup>[7]</sup>探讨了模拟酸雨对茶树器官化学计量比的影响。但对于模拟酸雨对稻田生态系统碳、氮、磷含量及其生态化学计量比影响的研究较少,因此开展酸雨对稻田土壤碳、氮、磷的相关研究显得尤为必要。

土壤生态化学计量学可以较好地表征 C、N、P 等元素的平衡、循环以及养分可获得性<sup>[8]</sup>。因此,生态化学计量学在近年来已是生态学研究关注的热点之一,愈发引起国内外学者的关注,国内生态化学计量学研究较国外相对不足。目前,国内研究多集中于探究植物体各器官 C、N、P 的分布特征、变化规律及其影响因子<sup>[9-10]</sup>,对土壤 C、N、P 化学计量学特征的研究主要集中于森林土壤、湿地土壤以及湖泊沉积物<sup>[11-13]</sup>,但对于稻田土壤 C、N、P 对模拟酸雨响应的研究较少。因此深入研究稻田土壤 C、N、P 化学计量学特征对酸雨的响应对指导农业生产具有重要的意义。

酸雨会严重影响水稻的可持续生产,而以水稻作为主要粮食作物的福州平原正处于中国东南部酸雨高发区<sup>[3]</sup>。本研究以福州平原水稻田为对象,设置对照组(CK)以及不同程度 pH 的酸雨处理组,主要对比酸雨不同强度下,水稻田土壤 C、N、P 含量变化,分析其化学计

量学特征,不仅对维持稻田土壤肥力稳定性有重要意义,也可为水稻可持续生产提出科学指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

选取福建省水稻研究所吴凤综合实验基地为本试验区,试验区内为早稻—晚稻—蔬菜轮作制度,水稻株行距 14 cm×28 cm,采用机插,水稻品种分别选取江西省农科院和福建省农科院研发的“禾盛 10 号”和“沁香优 212”,早晚稻的移栽和收割分别于 2015 年 4 月 16 日和 2015 年 7 月 17 日,2015 年 7 月 25 日和 2015 年 11 月 7 日进行<sup>[14]</sup>。稻田耕层土壤全碳(TC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量分别为(18.16±0.36),(1.93±0.11),(1.80±0.06) g/kg。水稻生长期实行水淹—烤田—淹水—湿润灌溉管理方式。本研究中的主要施加肥料为尿素(46% N)和复合肥(N—P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>—K<sub>2</sub>O 为 16—16—16),移栽前 1 天、1 周后和 8 周后分别施加底肥(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 分别为 42,40,40 kg/hm<sup>2</sup>)、分蘖肥(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 分别为 35,20,20 kg/hm<sup>2</sup>)和穗肥(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 分别为 18,10,10 kg/hm<sup>2</sup>)。为保持土壤均一,在试验前人工整平翻耕后的田地<sup>[15]</sup>。

### 1.2 试验设计

设置对照组(CK),并分别设置 pH 为 4.5,3.5,2.5 的酸雨处理组,模拟酸雨的不同 pH 程度,共 4 种处理,每种处理 3 个重复。选取试验区插秧后第 1 天,秧苗长势较均一的地点作为采样点。模拟酸雨溶液的主要成分及含量根据福州市历年酸雨主要成分配制:Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>(147.96,13.40,24.086,72.97,47.35,159.44,119.19,76.35 μmol/L)。用来调节酸雨不同程度的 pH 的溶液按照 1:1 的比例用浓 HNO<sub>3</sub> 和浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 配置而成<sup>[14]</sup>。水稻移栽后至水稻收割期间,每隔 7 天在各个样方喷淋 450 mL 酸雨,施加量根据福州市历年年均酸雨降水量计算得出。

### 1.3 样品采集与测定

土样采集:在水稻返青、拔节和成熟期分别对 4

种处理,共12个采样点进行土样采集。将稻田犁耕层0—15 cm的土壤用取土器取出,用自封袋密封取出的土柱,并保存在便携式保温箱内,带回实验室。把植物残体和杂质从土壤中剔除,土样一分为二,分别4℃冰箱冷藏和自然风干待用。其中,土壤全碳(TC)、氮(TN)采用Elementar Vario MAXCN元素分析仪测定,全磷采用硫酸—高氯酸消解<sup>[16]</sup>后在SKALAR SAN++连续流动分析仪进行测定。土壤含水量用TDR300土壤水分测定仪测定;电导率(EC)和土温采用2265 FS便携式电导/温度计测定;土壤pH采用STARTER 300 pH计测定;土壤容重采用环刀法<sup>[17]</sup>测定。

#### 1.4 数据处理与分析

分别运用Excel 2016、Origin 8.6、SPSS 20.0统计分析软件对测定数据进行整理和绘图。其中,采用Excel 2016软件对数据的平均值和标准偏差进行计算并制表,运用Origin 8.6软件绘制含量及比值图,并对土壤全碳、全氮和全磷进行线性拟合并制图。土壤C/N、C/P、N/P

采用质量比,采用SPSS 20.0软件对早晚稻土壤碳氮磷含量及C/N、C/P和N/P进行单因素方差分析;对早晚稻土壤碳氮磷含量及C/N、C/P和N/P进行重复测量方差分析;对环境因子与碳、氮、磷含量及C/N、C/P和N/P进行Pearson相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 酸雨对土壤碳、氮、磷含量的影响

由图1可知,酸雨处理下土壤TC含量均值均大于CK组( $P < 0.05$ ),其中晚稻差异最为显著( $P < 0.01$ )。此外,水稻成熟期各处理土壤TC含量均值均小于返青期和拔节期( $P < 0.01$ )。酸雨处理下土壤TN含量均值均大于CK组( $P < 0.05$ ),早晚稻均有显著差异( $P < 0.01$ ),此外,水稻拔节期各处理土壤TN含量均值均小于返青期和成熟期( $P < 0.01$ )。酸雨处理下土壤TP含量均值均大于CK组( $P < 0.05$ ),早晚稻均有显著差异( $P < 0.01$ ),此外,水稻成熟期土壤TP含量均值均小于返青期和拔节期( $P < 0.01$ )。

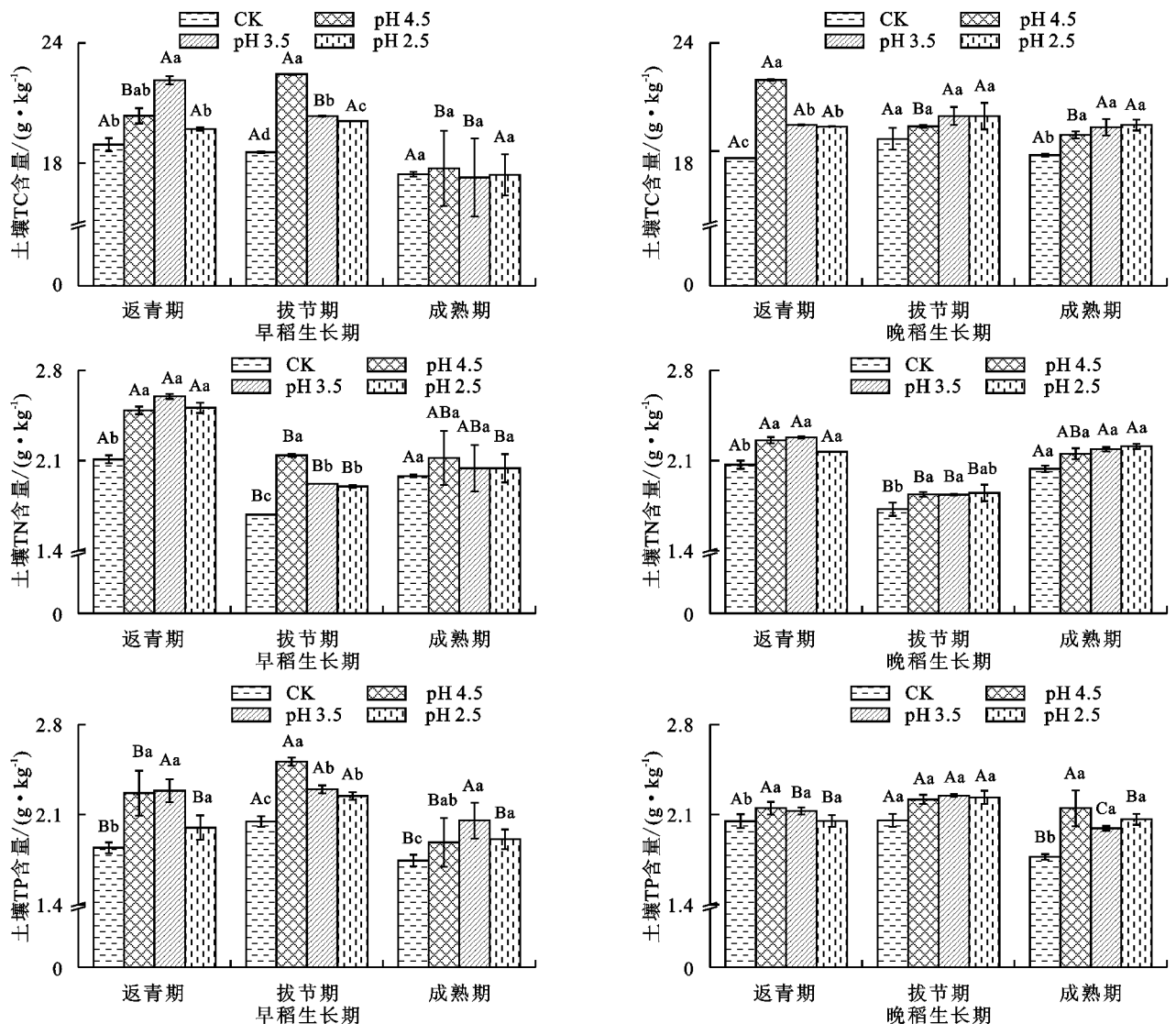


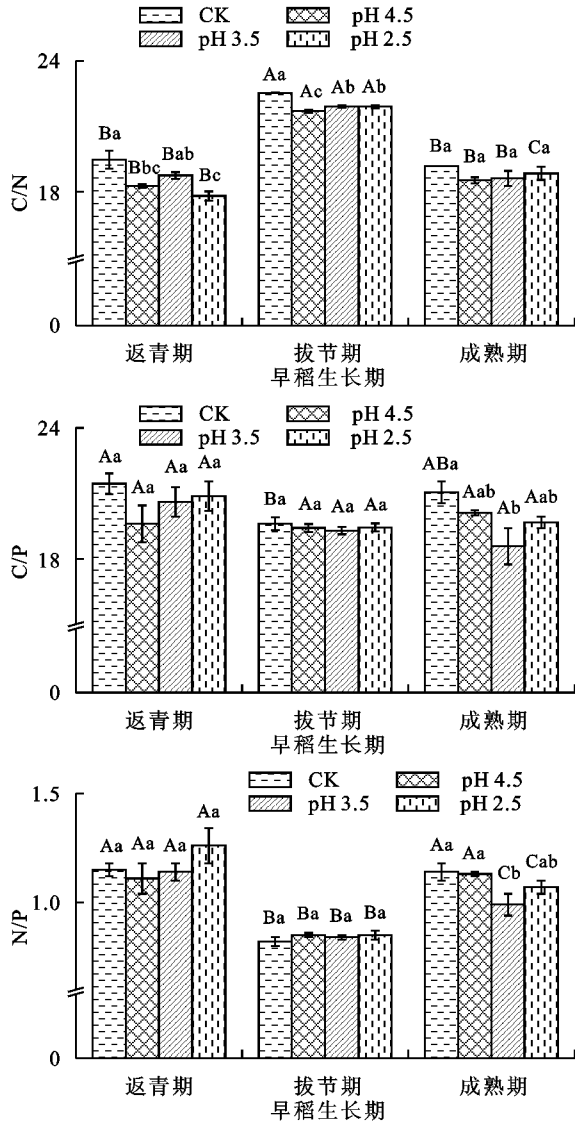
图1 酸雨作用下土壤全碳、土壤全氮和土壤全磷含量

## 2.2 土壤碳、氮、磷含量的回归分析

由表 1 可知,碳、氮、磷之间存在极显著正相关( $P < 0.01$ ),碳和氮、碳与磷元素之间从斜率上看呈现良好的线性相关,其中碳与磷的相关程度较高,而氮与磷元素之间线性相关程度较低。

表 1 酸雨对土壤碳、氮、磷相关性的影响

指标	回归拟合方程	$R^2$	相关性 $P$
C 与 N	$y=0.07081x+0.72001$	$R^2=0.22344$	$<0.01$
C 与 P	$y=0.09110x+0.32900$	$R^2=0.52747$	$<0.01$
N 与 P	$y=0.14637x+1.78499$	$R^2=0.01564$	无明显相关性



## 2.3 酸雨对土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响

由图 2 可知,整个生长期内,酸雨处理下土壤 C/N、C/P 和 N/P 的平均值变化范围分别在 7.87~10.86, 8.38~9.91, 0.82~1.26。早稻各生长期酸雨处理下土壤 C/N、C/P 和 N/P 均小于 CK 组( $P < 0.05$ ),与早稻相比,晚稻 N/P 有显著下降,且 C/N、C/P、NP 在返青期均大于 CK 组( $P < 0.05$ )。早晚稻拔节期各处理土壤 C/N 均大于返青期和成熟期( $P < 0.01$ );早晚稻各生长期内 C/P 差异不显著;早晚稻拔节期各处理土壤 N/P 均小于返青期和成熟期( $P < 0.01$ )。

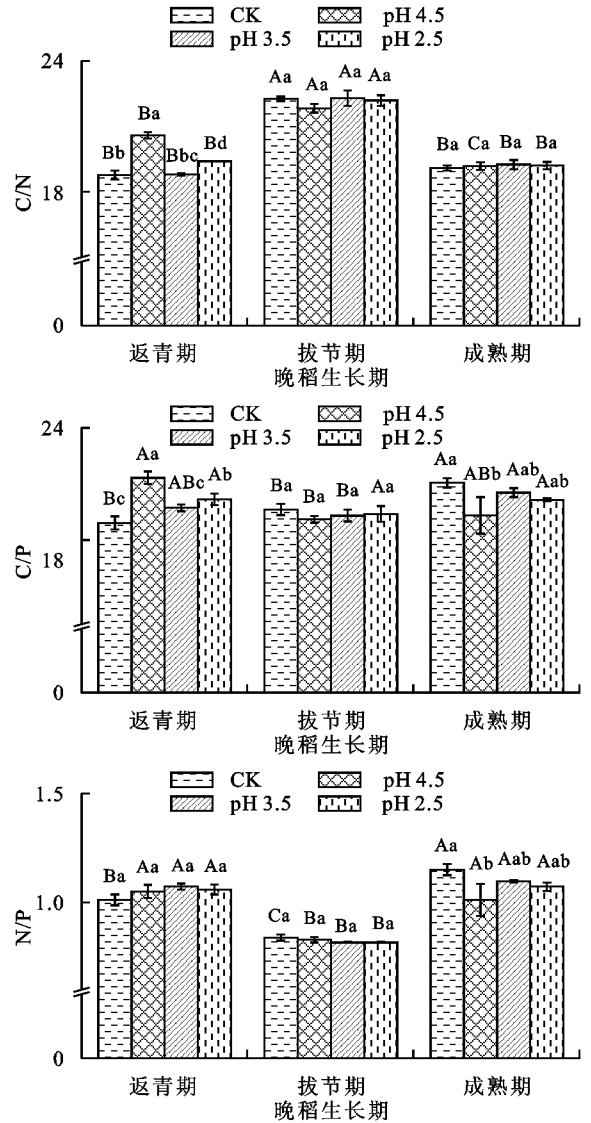


图 2 酸雨作用下土壤生态化学计量比

## 2.4 环境因子对土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量比的影响

综合来看,早稻生长期间 TC 与 EC、含水量、容重, TN 与容重, TP 与 EC 和含水量呈极显著正相关( $P < 0.01$ )(表 2); TN 与土温, pH 呈极显著负相关( $P < 0.01$ ); TC 与土温, TP 与 pH 呈较显著负相关( $P < 0.05$ ); TP 与容重呈较显著正相关( $P < 0.05$ )。晚稻生长期间 TC 与 pH 呈较显著负相关( $P < 0.05$ ), TN

与含水量与容重呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), TP 与 pH 呈较显著负相关( $P < 0.05$ )。全年综合来看, TC 与 EC 和土温呈极显著正相关( $P < 0.01$ ); TN 与 EC 和容重呈较显著正相关( $P < 0.05$ ), 与土温和含水量分别呈极显著正相关( $P < 0.01$ )与极显著负相关( $P < 0.01$ ); TP 与 EC 和土温呈较显著正相关( $P < 0.05$ ), 与容重呈较显著负相关( $P < 0.05$ )。

由表 3 可知,各自比例、土壤 pH、含水量和容重等

与土壤 C/N、C/P 和 N/P 均存在一定的影响。综合来看,在早稻生长期, C/N 和 N/P 与 TN 分别存在极显著负相关( $P<0.01$ )和极显著正相关( $P<0.01$ ); C/N 与 TP 存在较显著正相关( $P<0.05$ ), C/P 和 N/P 与 TP 均存在极显著负相关( $P<0.01$ ); C/P 与 EC 存在较显著正相关( $P<0.05$ ); C/N 与含水量存在较显著正相关( $P<0.05$ ), C/N 与容重, C/P 和 N/P 与含水量均存在极显著负相关( $P<0.01$ )。在晚稻生长期, C/P 和 N/P 与

TC 均存在较显著正相关( $P<0.05$ ); C/N 与 TN, C/P 和 N/P 与 TP 均存在极显著负相关( $P<0.01$ ), C/P 和 N/P 与 TN, C/N 与 TP、含水量, N/P 和容重均存在极显著正相关( $P<0.01$ ); C/N 和容重, N/P 和含水率, 均存在极显著负相关( $P<0.01$ )。全年综合来看, C/N 与 TC、TP、含水量和容重, C/P 和 N/P 与 TN 均存在极显著正相关( $P<0.01$ ), C/N 与 TN, C/P 与 TP 和含水量, N/P 与 TP、含水量和容重均存在极显著负相关( $P<0.01$ )。

表2 土壤碳、氮、磷含量与环境影响因子间的相关关系

生长期	处理	指标	EC	土温	含水量	pH	容重
早稻	CK	TC	0.548	-0.537	0.733*	0.715*	0.687*
		TN	0.767*	-0.795*	0.483	0.348	0.219
		TP	-0.267	0.283	0.075	0.244	-0.173
	pH 4.5	TC	0.409	0.028	0.540	0.307	-0.802**
		TN	0.374	-0.717*	0.745*	0.212	-0.279
		TP	0.398	0.001	0.505	0.342	-0.895**
	pH 3.5	TC	0.921**	-0.528	0.774*	-0.156	-0.077
		TN	0.529	-0.897**	0.667*	-0.295	0.392
		TP	0.753*	-0.193	0.511	-0.167	-0.102
	pH 2.5	TC	0.526	-0.240	0.598	0.269	-0.909**
		TN	0.278	-0.934**	0.659	0.563	-0.285
		TP	0.304	0.288	0.175	-0.037	-0.662
晚稻	CK	TC	-0.432	-0.114	-0.224	0.329	-0.089
		TN	0.398	0.105	0.088	-0.634	0.314
		TP	0.557	0.716*	0.616	0.559	-0.877**
	pH 4.5	TC	0.923**	0.924**	0.879**	0.457	-0.912**
		TN	0.485	0.242	0.339	0.056	-0.284
		TP	-0.039	0.006	-0.091	-0.339	0.129
	pH 3.5	TC	-0.072	0.066	0.156	0.082	-0.336
		TN	0.408	0.229	0.176	-0.188	0.309
		TP	0.173	0.482	0.427	0.652	-0.823**
	pH 2.5	TC	-0.286	-0.078	-0.206	0.173	-0.113
		TN	0.105	-0.067	0.141	-0.034	0.029
		TP	-0.226	-0.088	-0.273	0.009	-0.110
早稻	综合	TC	0.706**	-0.363*	0.707**	-0.285	0.608**
		TN	0.154	-0.710**	0.286	-0.474**	0.643**
		TP	0.611**	-0.073	0.595**	-0.340*	0.389*
晚稻	综合	TC	0.124	0.238	0.241	-0.354*	-0.107
		TN	0.160	0.150	0.519**	0.138	0.464**
		TP	0.263	0.249	0.127	-0.378*	-0.067
全年	综合	TC	0.396**	0.439**	-0.207	-0.105	-0.213
		TN	0.255*	0.413**	-0.688**	-0.150	0.262*
		TP	0.275*	0.247*	0.042	-0.132	-0.232*

注: \* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。下同。

### 3 讨论

#### 3.1 酸雨对土壤碳、氮、磷含量的影响

本研究中,酸雨明显增加了土壤中碳、氮、磷的含量。其中,酸雨对土壤碳含量增加效应主要是因为:一方面,酸雨沉降下植物生长受到影响,酸雨沉降到植株上会影响光合作用和降低叶绿素含量,导致叶片

损害,植株生长不良,产生了更多的凋落物<sup>[4,18]</sup>,这类凋落物养分含量比正常枯萎的凋落物更高,因此其分解过程更快<sup>[19]</sup>,从而向土壤中输入更多的碳;另一方面,在稻田这种厌氧生境中,酸雨对土壤的淋溶对碳释放过程也会产生影响,Dise 等<sup>[20]</sup>研究发现,模拟酸雨降低了土壤甲烷形式碳的释放,这与甲烷产生菌和

硫酸盐还原菌生长受到酸雨胁迫有关,另外酸沉降明显增加了土壤中的硫酸盐、硝酸盐等电子受体,可通过提高土壤 *Eh* 值来降低甲烷产生菌活性<sup>[21]</sup>,从而一定程度减少了土壤甲烷形式碳的排放。此外,Zhang

等<sup>[22]</sup>研究发现,酸雨可降低土壤细菌多样性,抑制微生物活性,土壤有机物矿化分解速率也会相应减慢,从而抑制了土壤碳的分解,导致土壤碳的积存,提高了土壤碳含量。

表 3 生态化学计量比与土壤碳氮磷及环境影响因子间的相关关系

生长期	处理	指标	TC	TN	TP	EC	土温	含水量	pH	容重
早稻	CK	C/N	0.391	-0.930**	0.842**	-0.504	0.527	-0.164	-0.040	0.023
		C/P	0.120	0.767*	-0.856**	0.569	-0.586	0.314	0.109	0.574
		N/P	-0.220	0.939**	-0.923**	0.562	-0.593	0.238	0.070	0.204
	pH 4.5	C/N	0.658	-0.307	0.626	0.131	0.656	-0.047	0.162	-0.649
		C/P	-0.314	-0.082	-0.640	-0.118	0.011	-0.145	-0.219	0.624
		N/P	-0.657	0.201	-0.775*	-0.135	-0.520	-0.015	-0.201	0.773*
	pH 3.5	C/N	0.254	-0.464	0.436	0.453	0.595	0.057	0.218	-0.677*
		C/P	0.836**	0.744*	0.325	0.741*	-0.607	0.703*	-0.131	-0.033
		N/P	0.380	0.856**	-0.100	0.170	-0.863**	0.440	-0.245	0.471
	pH 2.5	C/N	0.352	-0.782*	0.759*	0.085	0.754*	-0.244	-0.353	-0.328
		C/P	0.257	0.805**	-0.443	0.257	-0.724*	0.544	0.408	-0.267
		N/P	-0.106	0.884**	-0.690*	0.078	-0.836**	0.427	0.453	0.072
晚稻	CK	C/N	0.695*	-0.957**	0.381	-0.628	0.659	-0.299	-0.154	-0.220
		C/P	0.115	0.114	-0.875**	-0.601	0.625	-0.717*	-0.874**	-0.237
		N/P	-0.490	0.819**	-0.793*	0.155	-0.169	-0.173	-0.374	0.043
	pH 4.5	C/N	0.177	-0.703*	0.226	0.502	0.098	0.513	0.665	-0.853**
		C/P	0.797*	0.616	-0.734*	0.434	-0.767*	0.745*	0.237	-0.189
		N/P	0.481	0.881**	-0.734*	0.007	-0.618	0.250	-0.253	0.373
	pH 3.5	C/N	0.595	-0.959**	0.756*	0.237	0.708*	-0.092	0.266	-0.655
		C/P	0.063	0.514	-0.812**	-0.818**	0.073	-0.591	-0.370	0.659
		N/P	-0.427	0.954**	-0.879**	-0.411	-0.569	-0.098	-0.404	0.753*
	pH 2.5	C/N	0.427	-0.934**	0.848**	0.363	0.534	0.009	-0.072	-0.616
		C/P	0.203	0.643	-0.609	-0.163	-0.490	0.211	0.005	0.155
		N/P	-0.292	0.954**	-0.877**	-0.347	-0.524	0.001	0.056	0.615
早稻	综合	C/N	0.295	-0.606**	0.409*	0.048	-0.118	0.624**	0.115	-0.444**
		C/P	0.128	0.328	-0.471**	0.375*	0.306	-0.432**	0.270	0.040
		N/P	-0.139	0.625**	-0.538**	0.179	0.270	-0.689**	0.065	0.312
晚稻	综合	C/N	0.361*	-0.809**	0.495**	0.088	0.003	0.518**	0.071	-0.541**
		C/P	0.372*	0.426**	-0.621**	-0.250	0.030	-0.174	-0.159	0.047
		N/P	-0.097	0.824**	-0.719**	-0.170	0.008	-0.462**	-0.152	0.434**
全年	综合	C/N	0.304**	-0.680**	0.425**	0.066	-0.061	0.568**	0.093	-0.483**
		C/P	0.205	0.362**	-0.509**	0.083	0.177	-0.311**	0.070	0.044
		N/P	-0.120	0.697**	-0.581**	0.025	0.151	-0.578**	-0.030	0.360**

本研究中,酸雨对土壤全氮含量有所增加,首先可能是因为酸雨中的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  进入土壤,增加了氮含量;另外,土壤有机态氮中有一种非水解性有机态氮,经过酸雨淋溶后,这种氮可能会被水解为有效态氮,从而使土壤全氮量增加<sup>[23]</sup>。此外,安婉丽等<sup>[14]</sup>研究表明,模拟酸雨可一定程度减少土壤氧化亚氮的形式氮的释放,从而导致土壤氮的固存。本研究中酸雨显著提高了土壤磷含量,这可能是由于

土壤酸化加剧,水稻生长期凋落物增多,土壤酸化加速了凋落物养分的分解,导致土壤磷含量增高<sup>[24]</sup>。此外,土壤中活性氧化铁和活性铝的含量增高,促进了磷的活性吸附点位增多,磷酸根离子容易被吸附<sup>[25]</sup>,从而降低了磷在土壤中的移动性,使土壤固定更多的磷。

另有研究<sup>[4]</sup>表明,酸雨中的有毒金属离子对植物根系有毒害作用,当毒害加剧时,植物根系将脆弱畸

形,延缓植物生长;酸雨沉降到植株上还会影响光合作用和降低叶绿素含量,导致叶片损害,植株生长不良;因此水稻吸收养分的能力便会显著下降,促使土壤养分的积存,我国南方红壤多雨地区多发此种现象<sup>[7]</sup>。本研究还发现,土壤养分含量还会随着生长期的变化而有所不同。众多学者<sup>[26-27]</sup>研究表明,水稻生长以及土壤养分含量变化受施肥、田间管理等因素的影响。本研究中,以氮为例,拔节期土壤氮含量均小于返青期和成熟期的原因可能是在返青期由于施加复合肥和氮肥的原因,肥料中含有较多的氮元素,土壤氮含量增加。其次,水稻在各生长期对养分吸收的效率也有所差异,在成熟期,由于水稻干枯,生长活性明显下降,水稻对氮的吸收明显减少,并且烤田阶段土壤水分含量少,土壤氮矿化速率减慢,导致稻田氮含量较拔节期增加。

### 3.2 酸雨影响下土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征及其指示作用

整个生长期酸雨处理下土壤 C/N、C/P 和 N/P 基本均小于无酸雨处理组。一般来说较低的土壤化学计量比可以有效反映土壤有机质组成和稳定,土壤 C/N、C/P 作为敏感指标可以反映土壤质量<sup>[28]</sup>。在本研究中可能是由于酸雨淋溶的影响,产生较多养分含量较高的凋落物,这种凋落物分解过程中,释放的碳与氮、磷比例相对较小,从而输入土壤里的碳、氮、磷均较多,此外,由于植物生长受到影响,养分吸收量少,微生物活性较弱,土壤养分积聚较多,从而导致了较低土壤碳含量与养分生态化学计量学比值。N/P 作为限制性养分判断的重要指标,其较低的比值一般反映植物受到氮限制<sup>[29]</sup>;这表明本研究中酸雨影响下水稻生长主要受到氮的限制,主要是由于酸雨胁迫和生长期高温多雨的影响,氮元素流失较大,而磷元素矿化迁移速率相对较低,因此较低的氮,较高磷的积累模式,形成较低 N/P。

从生长季节来看,晚稻土壤 N/P 较早稻有显著下降,这可能是由于晚稻生长期一直处于高温,微生物活动剧烈,水稻长势旺盛,均对养分需求量大,特别是对于氮养分需求更大,导致晚稻 N/P 较早稻稍有下降<sup>[30]</sup>。早晚稻拔节期各处理土壤 C/N 均大于返青期和成熟期,可能是由于水稻生长主要受氮的限制,而 C/N 较高时,土壤有机质分解速率较低,这时微生物需要吸收更多的氮来满足它们的生长,因而土壤氮含量消耗过多导致氮在土壤中的固存较低<sup>[31]</sup>。另外,在早晚稻拔节期间各处理下土壤 N/P 均小于返青期和成熟期也跟拔节期 C/N 较高产生机制相

同,因为拔节期是水稻与微生物对养分需求最大的阶段,特别是对氮养分需求更高的稻田,植物与微生物对氮的吸收利用量增加,导致土壤氮含量降低,从而使 N/P 较其他生长期有所下降。

环境因子对土壤 C/N、C/P 和 N/P 也有不同程度的影响。本研究发现,土壤 C/N 和 N/P 与含水率分别呈极显著负相关和极显著正相关;这可能是由于含水率升高时,稻田淹水程度较高,土壤中的氮主要就转化为水溶性氮存在于水体中,增加了水体中的氮含量,从而产生土壤氮的损失,而磷相对于氮而言,更为稳定,较少淋溶损失<sup>[32]</sup>。土壤 C/N 和 N/P 与容重分别呈极显著正相关和极显著负相关;一般来说较低的容重表征着土壤较疏松,具有较高的肥力<sup>[22]</sup>,因而土壤氮含量随着容重降低而增大,故 C/N 和 N/P 较高。

在本研究中酸雨作用下,福州平原稻田土壤正面临着酸化问题,这将限制水稻产量形成。针对这一问题,可通过以下措施进行缓解,应该积极培育耐酸的水稻品种,并施用石灰或生物炭等碱性物质进行土壤酸化的调节<sup>[33]</sup>。

## 4 结论

(1)稻田土壤碳、氮、磷含量具有较为明显的生长期变化,酸雨处理提高了稻田土壤各生长期土壤碳、氮、磷含量。

(2)酸雨影响下土壤碳和氮、碳与磷元素之间相关性以及拟合程度较高,其中氮与磷元素之间相关性以及拟合的程度低于其他元素。

(3)稻田土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征具有较为明显的生长期变化,受酸雨影响显著,酸雨一定程度上增加了土壤 C/N、C/P 和 N/P。

致谢:本研究在野外采样和室内分析过程中得到福建师范大学蓝兴福、王晓彤和徐康等同学的帮助,在此一并表示深深地感谢!

### 参考文献:

- [1] Wang X Q, Liu Z, Niu L, et al. Long-term effects of simulated acid rain stress on a staple forest plant, *Pinus massoniana*, Lamb: A proteomic analysis [J]. *Trees*, 2013, 27(1): 297-309.
- [2] 季晓燕,江洪,洪江华,等. 模拟酸雨对亚热带 3 个树种凋落叶分解速率及分解酶活性的影响[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(7): 2027-2035.
- [3] 陈彬彬,王宏,郑秋萍,等. 福建省区域酸雨特征及成因分析[J]. *气象与环境学报*, 2016, 32(4): 70-76.
- [4] 朱迎迎,金璠,朱勇良. 两种叶面肥对酸雨胁迫下水稻分蘖期生理指标影响[J]. *分子植物育种*, 2018, 16(14): 4785-4792.

- [5] Berger T W, Muras A. Predicting recovery from acid rain using the micro-spatial heterogeneity of soil columns downhill the infiltration zone of beech stem flow: Introduction of a hypothesis [J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2016, 2(3): 154-160.
- [6] 梁国华,张德强,卢雨宏,等. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤 CNP 生态化学计量特征对长期模拟酸雨的响应[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(5): 844-851.
- [7] 张宇飞,方向民,陈伏生,等. 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[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(4): 1309-1316.
- [8] 叶春,蒲玉琳,张世榕,等. 湿地退化条件下土壤碳氮磷储量与生态化学计量变化特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(6): 181-187.
- [9] 洪江涛,吴建波,王小丹. 全球气候变化对陆地植物碳氮磷生态化学计量学特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2658-2665.
- [10] 戚德辉,温仲明,王红霞,等. 黄土丘陵区不同功能群植物碳氮磷生态化学计量特征及其对微地形的响应[J]. *生态学报*, 2016, 36(20): 6420-6430.
- [11] 李路,常亚鹏,许仲林. 等. 天山雪岭云杉林土壤 CNP 化学计量特征随水热梯度的变化[J]. *生态学报*, 2018, 38(22): 8139-8148.
- [12] 付姗,吴琴,尧波,等. 南矾湿地土壤碳、氮、磷化学计量比沿水位梯度的分布[J]. *湿地科学*, 2015, 13(3): 374-380.
- [13] 闫玉琴,解刚,项宇,等. 毛乌素沙地湖滨带沉积物碳氮磷生态化学计量学特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 223-228.
- [14] 安婉丽,曾从盛,王维奇,等. 模拟酸雨对福州平原水稻田温室气体排放的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(10): 3984-3994.
- [15] Wang W, Zeng C, Sardans J, et al. Amendment with industrial and agricultural wastes reduces surface-water nutrient loss and storage of dissolved greenhouse gases in a subtropical paddy field [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2016, 231: 296-303.
- [16] 张英利,许安民,杨玉秀,等. 自动分析仪测定土壤全磷的方法探讨[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(4): 168-171.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [18] 宋晓梅,曹向阳. 模拟酸雨对不同园林植物叶片生理生态特性的影响[J]. *水土保持研究*, 2017, 31(2): 365-370.
- [19] Lv Y, Wang C Y, Jia Y Y, et al. Effects of sulfuric, nitric, and mixed acid rain on litter decomposition, soil microbial biomass, and enzyme activities in subtropical forests of China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 79: 1-9.
- [20] Dise N B, Verry E S. Suppression of peatland methane emission by cumulative sulfate deposition in simulated acid rain [J]. *Biogeochemistry*, 2001, 53(2): 143-160.
- [21] Wang Z P, Delaune R D, Lindau C W, et al. Methane production from anaerobic soil amended with rice straw and nitrogen fertilizers [J]. *Fertilizer Research*, 1992, 33(2): 115-121.
- [22] Zhang X M, Liu W, Zhang G M, et al. Mechanisms of soil acidification reducing bacterial diversity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 81: 275-281.
- [23] 张新明,张俊平,刘素萍,等. 模拟酸雨对荔枝园土壤氮素迁移和土壤酸化的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 18-21.
- [24] Krivtsov V, Liddell K, Bezginova T, et al. Forest litter bacteria: Relationships with fungi, microfauna, and litter composition over a winter-spring period [J]. *Polish Journal of Ecology*, 2005, 53(3): 383-394.
- [25] 徐华勤,章家恩,余家瑜,等. 模拟酸雨对赤红壤磷素及  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  淋失特征的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011(5): 1172-1178.
- [26] 徐一兰,唐海明,程爱武,等. 长期不同施肥模式对双季稻田土壤养分及水稻产量的影响[J]. *华北农学报*, 2017, 32(6): 192-197.
- [27] Becker M, Asch F, Maskey S L, et al. Effects of transition season management on soil N dynamics and system N balances in rice-wheat rotations of Nepal [J]. *Field Crops Research*, 2007, 103(2): 98-108.
- [28] 李占斌,周波,马田田,等. 黄土丘陵区生态治理对土壤碳氮磷及其化学计量特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 312-318.
- [29] Zhang P, Wei T, Li Y L, et al. Effects of straw incorporation on the stratification of the soil organic C, total N and C : N ratio in a semiarid region of China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 153: 28-35.
- [30] Liu Y X, Yang M, Wu Y M, et al. Reducing  $\text{CH}_4$  and  $\text{CO}_2$  emissions from waterlogged paddy soil with biochar [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(6): 930-939.
- [31] 赵维俊,刘贤德,金铭,等. 祁连山青海云杉林叶片一枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. *土壤学报*, 2016, 53(2): 477-489.
- [32] 俞映惊,薛利红,杨林章. 不同氮肥管理模式对太湖流域稻田土壤氮素渗漏的影响[J]. *土壤学报*, 2011, 48(5): 988-995.
- [33] 周娟,袁珍贵,郭莉莉,等. 土壤酸化对作物生长发育的影响及改良措施[J]. *作物研究*, 2013, 27(1): 96-102.