广东农业科学 2019，46（8）：56-64
Guangdong Agricultural Sciences doi：10.16768/j.issn.1004-874X.2019.08.008

韩小美，陆湘云，杨梅，刘世男，王永堂，唐梦云，翟卫玲 . 模拟酸沉降对桉树纯林和混交林土壤化学性质的影响［J］. 广东农业科学，2019，46（8）：56-64.

模拟酸沉降对桉树纯林和混交林土壤化学性质的影响

韩小美[1]，陆湘云[2]，杨 梅[1]，刘世男[1]，王永堂[1]，唐梦云[1]，翟卫玲[1]
（1. 广西大学林学院，广西 南宁 530004；2. 广西国有高峰林场，广西 南宁 530001）

摘 要：【目的】研究在不同酸度的模拟酸雨下，桉树纯林和桉树 + 红椎混交林土壤化学性质的变化。【方法】通过严格的土柱淋洗试验，模拟酸雨 pH 分别为 3.0、4.0、5.6、6.0。【结果】酸雨处理下两种林分土壤和土壤淋洗液 pH 值均随酸雨 pH 的降低而降低，桉树纯林土壤 pH 的平均下降幅度为 1.41，桉树 + 红椎混交林为 1.66；土壤淋洗液养分含量随酸雨 pH 的降低而增加；两种林分土壤全氮、铵态氮、硝态氮含量均随酸雨 pH 的降低先增加后降低；土壤全磷和速效磷含量在桉树纯林中随酸雨 pH 的降低而显著降低，在桉树 + 红椎混交林中无显著变化；同一 pH（pH3.0）条件下，与 CK 对比，桉树纯林土壤全氮、硝态氮和铵态氮的下降率分别为 28.7%、46.6%、12.4%，桉树 + 红椎混交林下降率分别为 18.9%、23.5%、11.3%。【结论】两种林分对比可知，桉树 + 红椎混交林对酸雨的缓冲能力强于桉树纯林。

关键词：模拟酸雨；桉树纯林；混交林；土壤；化学性质
中图分类号：S796 **文献标志码**：A **文章编号**：1004-874X（2019）08-0056-09

Effects of Simulated Acid Deposition on Soil Chemical Properties of Pure Eucalyptus and Mixed Forest

HAN Xiaomei[1], LU Xiangyun[2], YANG Mei[1], LIU Shinan[1],
WANG Yongtang[1], TANG Mengyun[1], ZHAI Weiling[1]
（1. *College of Forestry, Guangxi University, Nanning* 530004, *China;*
2. *Guangxi State-owned Peak Forest Farm, Nanning* 530001, *China*）

Abstract：【Objective】The changes of soil chemical properties of pure eucalyptus forest and mixed forest (eucalyptus + *Castanopsis hystrix*) under different simulated acid rains were studied.【Method】The pH of the acid rain was simulated to be 3.0, 4.0, 5.6 and 6.0 by a strict soil column leaching test.【Result】The pH values of soil and soil leaching solution decreased with the decrease of acid rain pH under acid rain treatment. The average pH of pure eucalyptus forest soil decreased by 1.41, and that of mixed forest (eucalyptus + *C. hystrix*) decreased by 1.66. The nutrient contents of the leaching solution increased with the decrease of acid rain pH; the contents of soil total N, ammonium N and nitrate N in the two forests increased first and then decreased with the decrease of acid rain pH, and soil P and available P in the pure eucalyptus forest decreased significantly with the decrease of acid rain pH while there was no significant change in soil P and available P in the mixed forest (eucalyptus + *C. hystrix*). Under same pH (pH=3.0), compared with CK, the decline rates of total N, nitrate N and ammonium N in the pure eucalyptus forest soil were 28.7%, 46.6% and 12.4%, respectively, and those of the mixed forest(eucalyptus + *Castanopsis hystrix*) were 18.9%, 23.5% and

---

收稿日期：2019-01-15
基金项目：广西创新驱动发展专项资金（桂科 AA17204087-6）；广西自然科学基金（2015GXNSFAA139081）
作者简介：韩小美（1994—），女，在读硕士生，E-mail:2996412484@qq.com
通信作者：刘世男（1985—），女，博士，讲师，E-mail: 296111600@qq.com

11.3%, respectively. 【Conclusion】 The comparison of the two forest stands shows that the buffering capacity of mixed forest of eucalyptus and *C. hystrix* to acid rain is stronger than that of pure eucalyptus forest.

Key words: simulated acid rain; pure eucalyptus forest; mixed forest; soil; chemical properties

【研究意义】酸雨已经成为全球性的环境问题，我国酸雨区域面积占国土面积的 30%，已成为继欧洲、北美之后的世界第三大重酸雨区域[1]，目前已经形成华中、西南、华南和华东四大酸雨区。广西地处华南，是酸雨污染较为严重的区域[2-3]。【前人研究进展】刘厚田等[4]认为铝中毒是南山酸雨对马尾松的主要危害，土壤酸化的不良后果主要有：使土壤 K、Na、Ca 和 Mg 等养分含量降低[5]，重金属活化[6-7]，土壤出现 Al 毒[8-10]和 Mn 毒[11]。【本研究切入点】森林是陆地生态系统中重要的组成部分，森林土壤一旦酸化，将会导致森林大面积死亡，桉树是广西森林生态系统的重要组成树种，具有速生、高产、轮伐期短、经济效益显著等特点[12-14]，广西桉树面积和产量均居全国前列[15]。然而，桉树对土壤的危害近年来饱受争议，有人认为桉树是“抽水机”“耗肥机”，甚至认为桉树有毒，进而对桉树有抵触情绪。也有研究认为桉树人工林之所以会出现这种情况，主要是酸雨沉降，导致土壤酸化，土壤被酸化后会加速土壤中交换性离子淋失，降低某些重要营养元素（如 Ca、Mg）对林木生长的有效性，产生土壤肥力下降等各种问题[16-17]。由于酸雨对桉树人工林土壤造成严重危害，所以营造桉树与其他树种人工混交林日益受到人们重视，唐仕明[18]通过调查桉树与大叶相思的行间混交情况，发现桉树与大叶相思混交可以改良土壤、涵养水源、调节气候、促进生态平衡、提高林分的抗灾害能力。邓海燕等[19]也认为营造合适的桉树与其他树种的混交林可以更充分地利用林地条件，增强抗御灾害和病虫害的能力。【拟解决的关键问题】本研究以广西南宁高峰林场的 10 年生巨尾桉纯林和 10 年生巨尾桉与红椎混交林两种林分的林间土壤作为试验材料，通过人为模拟酸沉降，分析了不同酸度淋溶下的两林分土壤化学性质变化，比较两种林分对酸雨的缓冲能力，判定该混交树种的适宜性，为该区今后选择营造混交林树种提供依据。

1 材料与方法

1.1 采样地概况

广西国有高峰林场位于广西南宁市盆地北缘，属大明山山脉，地理坐标为 108° 08'~108° 53' E、22° 49' ~23° 15' N，海拔 150 ~ 400 m。地貌主要由山丘和丘陵构成，丘陵占全场面积的 55.5%，山地占 38.7%[20]。土壤构成物质为古生代的泥岩、泥质页岩、砂页岩等沉积岩系，局部有石英砂岩、花岗岩及第四纪沉积物，风化发育为赤红壤[21]。样地属热带北缘气候，雨量充足，年平均气温在 21 ℃左右，极端最低温 –2 ℃，极端最高气温为 40 ℃，积温为 7 500 ℃左右，年降雨量为 1 200~1 500 mm、多集中在每年 6~9 月[22]。

1.2 采样方法

在广西南宁高峰林场，选择具有代表性的 10 年生巨尾桉纯林、10 年生巨尾桉与红椎混交林两种人工林，均采用无性系造林，在每个林分中按上坡、中坡、下坡设置 20 m × 20 m 的样地，每个林分设置 3 个样地，在样地内按照对角线法挖取各样地土壤剖面，采集 0 ~ –20 cm 的土样装入塑料袋中，每个样地取 3 个土样，贴好标签，带回实验室。

表 1 采样林分基本信息

Table 1 Basic information of sampling forests

林分类型 Forest type	pH	全氮 Total N（mg/g）	铵态氮 Ammonium N（mg/g）	硝态氮 Nitrate N（mg/kg）	全磷 Total P（mg/g）	速效磷 Available P（mg/kg）
桉树纯林 Pure eucalyptus forest	3.88	0.596	0.099	2.01	0.218	8.95
桉树 + 红椎混交林 Eucalyptus + *Castanopsis hystrix* mixed forest	3.91	0.605	0.109	2.20	0.247	9.08

1.3 试验设计

广西城市降水中阴离子主要是以 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 为主[23]，按照广西城市降水中 SO_4^{2-} 和

NO_3^- 组成的配比[24–26]，调配 H_2SO_4 和 HNO_3 溶液浓度比为 8 ∶ 1 的酸雨溶液，调配的酸雨溶液 pH 分别为 3.0、4.0、5.6，以 pH 值为 6.0 的清水为对照（CK）。模拟酸沉降试验所用酸雨总量相当于当地年均降水量，按广西桉树主要种植区年平均降水量 1 300 mm，树冠枝叶截留后剩余 70% 左右进入林地，每年进入林地土壤雨量为 910 mm。取 10 年生桉树纯林和桉树与红椎混交林 0 ~ –20 cm 土壤，分别装入 PVC 塑料管（高 40 cm、内径 7.5 cm），管底铺一层窗纱和玻璃棉，在土层上面分别按照林地落叶厚度覆盖大约 5 cm 厚度落叶，以恢复到桉树纯林和混交林的最原始状态。装置上方采用能控制流速的树体专用输液袋（1L）倒挂在 PVC 塑料管上方，下方用漏斗罩住，漏斗下方用塑料广口瓶接取淋洗液，且密封接口处，防止滤液蒸发，每个林分 4 个处理，每个处理 3 次重复。总共淋溶量约 4 L，淋溶速率控制在 100 mL/d 左右，试验历时 40 d。40 d 后进行滤液收集测定，淋溶后将土样取出，进行 pH 值测定，风干后进行养分测定。

1.4　测定方法

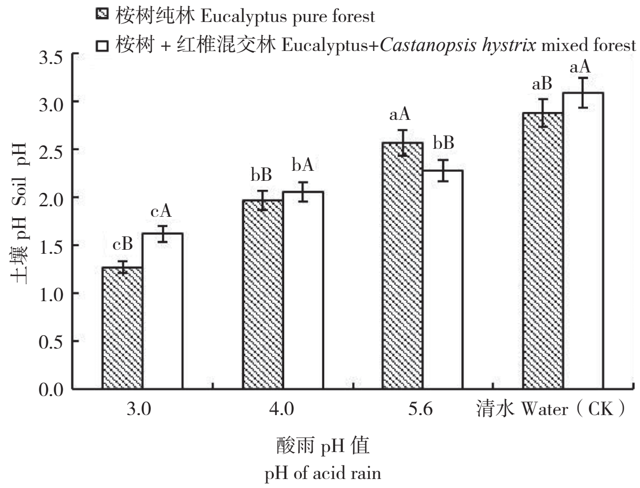
土壤和淋洗液 pH 值用 pH 计进行测定，全氮含量测定采用重铬酸钾 – 硫酸消化法，全磷含量测定采用氢氧化钠熔融 – 钼锑抗比色法，硝态氮（NO_3^-）、铵态氮（NH_4^+）和速效磷含量测定采用点滴比色联合速测法。

试验数据采用 SPSS 软件进行分析，并使用 Excel 软件进行作图。

2　结果与分析

2.1　模拟酸雨对两种林分土壤 pH 的影响

模拟酸沉降下两林分土壤 pH 值如图 1 所示。桉树纯林土壤 pH 值在各处理下表现为 pH 3.0 处理极显著低于 pH 5.6 处理和 CK，pH 5.6 处理和 CK 相比差异不显著。桉树 + 红椎混交林土壤 pH 值在各处理下表现为 pH 3.0 处理显著低于 pH 4.0 和 pH 5.6 处理，极显著低于 CK。CK 下两林分土壤 pH 值相比，桉树 + 红椎混交林土壤 pH 值极显著高于桉树纯林土壤，可知在不加外界酸雨处理下，桉树纯林土壤本身的酸性强于桉树 + 红椎混交林土壤，通常情况下土壤酸性越强，受酸雨酸化影响程度越大，可见桉树纯林受酸雨影响程度大于桉树 + 红椎混交林。在酸雨作用下，对两种林分土壤 pH 的平均下降幅度进行比较，桉树纯林的平均下降幅度为 1.41，混交林为 1.66，桉树 + 红椎混交林大于桉树纯林，说明桉树 + 红椎混交林土壤对酸的缓冲能力大于桉树纯林。



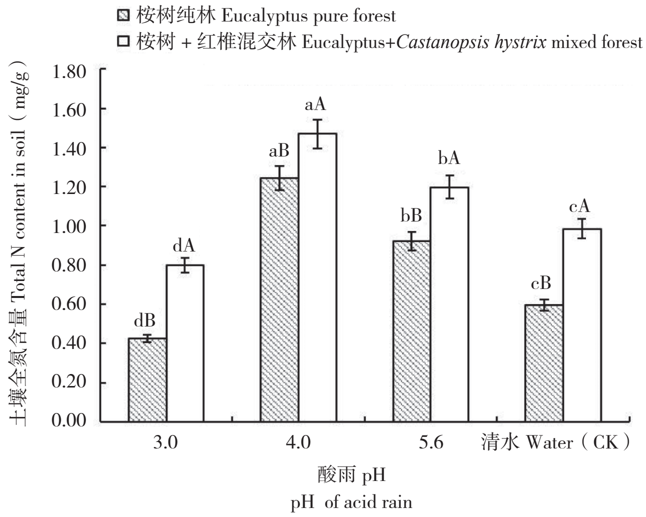
大写英文字母不同表示不同林分之间差异显著，小写英文字母不同表示同一林分间差异显著
Different capital letters represent significant differences between different stands, while different lowercase letters represent significant differences among the same stand

图 1　模拟酸沉降下两种林分土壤 pH 比较
Fig. 1　Comparison of soil pH of two stands under simulated acid deposition

2.2　模拟酸雨对两种林分土壤氮、磷含量的影响

2.2.1　酸沉降对土壤全氮含量的影响　模拟酸沉降下两种林分土壤全氮含量如图 2 所示。从图 2 可以看出，桉树纯林土壤全氮含量随模拟酸雨 pH 减小呈先增加后减少的趋势，pH 4.0 处理下土壤全氮含量最高，且极显著高于其他 3 个处理，各处理下土壤全氮含量大小为 pH 4.0 ＞ pH 5.6 ＞ CK ＞ pH 3.0。可见，酸雨 pH 4.0 是一个临界值，当酸雨 pH ≥ 4.0 时，酸雨对土壤全氮含量具有促进作用，显著增加土壤全氮含量，而当酸雨 pH ＜ 4.0 时，土壤全氮含量降低。桉树 + 红椎混交林各处理间的变化规律与桉树纯林变化规律一致，同样为酸雨 pH 4.0 时，土壤全氮含量最高。与对照相比，pH 3.0 处理下两种林分土壤全氮含量下降率分别为桉树纯林 28.7%、桉树 + 红椎混交林 18.9%。桉树 + 红椎混交林土壤全氮含量下降率小于桉树纯林，说明桉树 + 红椎混交林土壤对酸雨的缓冲能力和固氮能力强于桉树纯林。

2.2.2　酸沉降对土壤铵态氮含量的影响　模拟酸沉降下两种林分土壤铵态氮含量如图 3 所示，供试土壤铵态氮含量在酸雨 pH 5.6 处理下最大，极显著高于其他 3 个处理，与 CK 相比，pH 5.6 处

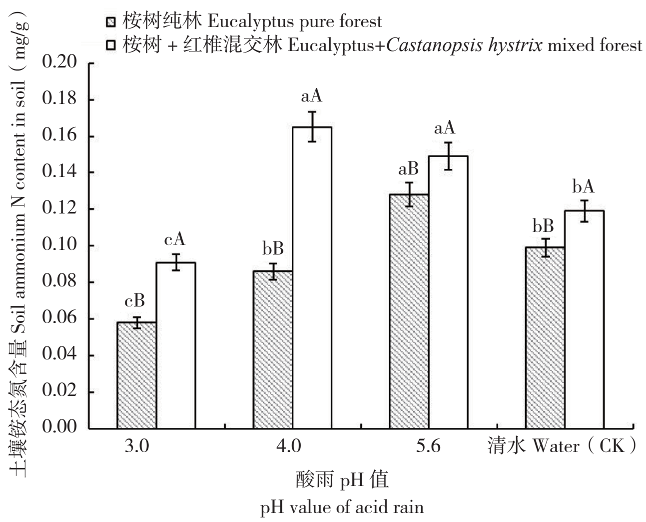


大写英文字母不同表示不同林分之间差异显著，
小写英文字母不同表示同一林分间差异显著
Different capital letters represent significant differences between different stands, while different lowercase letters represent significant differences among the same stand

图 2　模拟酸沉降下两种林分土壤全氮含量比较
Fig. 2　Comparison of total N content in soil of two stands under simulated acid deposition

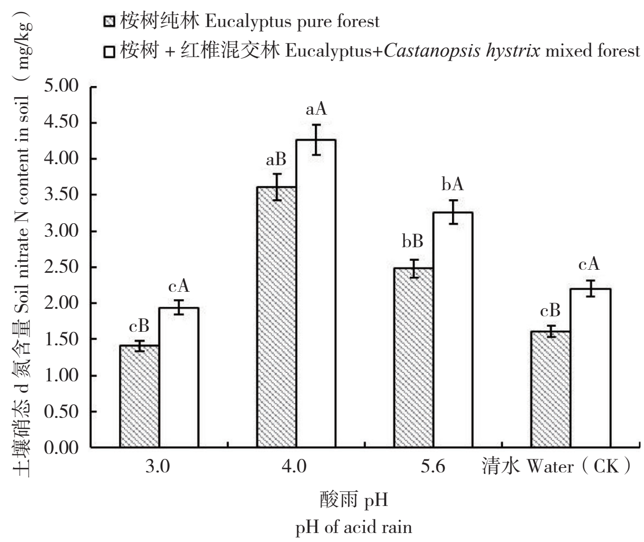
理土壤铵态氮含量处于增加状态，当酸雨 pH 小于 5.6 时，桉树纯林土壤铵态氮含量开始下降，且 pH 3.0 处理显著降低了土壤铵态氮含量，各处理下土壤铵态氮含量大小顺序为 pH 5.6 ＞ CK ＞ pH 4.0 ＞ pH 3.0。桉树 + 红椎混交林在酸雨 pH 4.0 处理达到最大，与 CK 相比，桉树 + 红椎混交林在酸雨 pH ≥ 4.0 时土壤铵态氮含量都处于增加状态，在 pH 3.0 处理下土壤铵态氮含量开始下降，且 pH 3.0 处理显著降低了土壤铵态氮含量。可见，不同 pH 酸雨处理下桉树纯林和桉树 + 红椎混交林变化有明显差异性，桉树纯林在 pH 5.6 时达到最大，桉树 + 红椎混交林在酸雨 pH 4.0 时最大。与 CK 相比，pH 3.0 处理下两种林分土壤铵态氮含量下降率分别为桉树纯林为 46.6%、桉树 + 红椎混交林 23.5%。桉树 + 红椎混交林铵态氮下降率远小于桉树纯林。

2.2.3　酸沉降对土壤硝态氮含量的影响　模拟酸沉降下两种林分土壤硝态氮含量如图 4 所示，从图 4 可以看出，桉树纯林供试土壤硝态氮含量随模拟酸雨 pH 的减小同样呈现先增加后降低的规律，pH 4.0 处理下硝态氮含量最高，极显著高于其他 3 个处理，pH 3.0 处理低于 CK。桉树 + 红椎混交林各处理间的变化规律与桉树纯林变化规律相一致。与 CK 相比，pH 3.0 处理下两种林分土壤硝态氮含量下降率分别为桉树纯林 12.4%、桉树 + 红椎混交林 11.3%。模拟酸沉降下两种林分对于硝态氮下降率大小相近，说明两种林分对于硝态氮的淋失无明显差异。



大写英文字母不同表示不同林分之间差异显著，
小写英文字母不同表示同一林分间差异显著
Different capital letters represent significant differences between different stands, while different lowercase letters represent significant differences among the same stand.

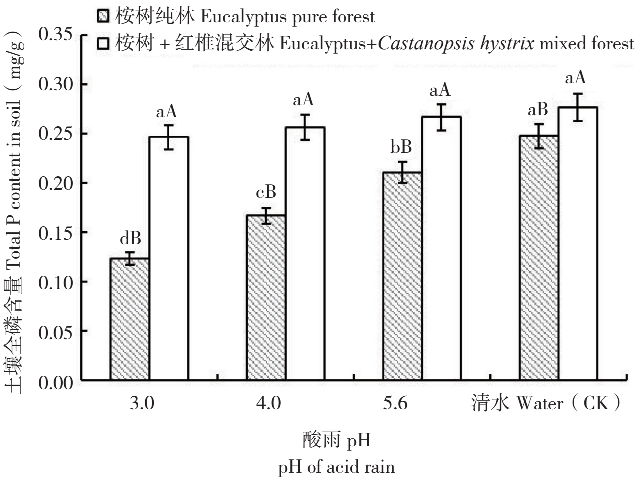
图 3　模拟酸沉降下两种林分土壤铵态氮含量比较
Fig. 3　Comparison of ammonium N content in soil of two stands under simulated acid deposition



大写英文字母不同表示不同林分之间差异显著，
小写英文字母不同表示同一林分间差异显著
Different capital letters represent significant differences between different stands, while different lowercase letters represent significant differences among the same stand

图 4　模拟酸沉降下两种林分土壤硝态氮含量比较
Fig. 4　Comparison of nitrate N content in soil of two stands under simulated acid deposition

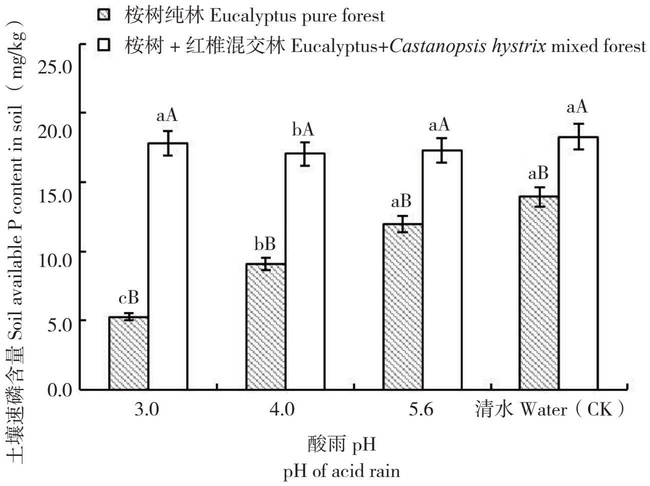
2.2.4 酸沉降对土壤全磷含量的影响 模拟酸沉降下两种林分土壤全磷含量如图 5 所示，从图 5 可以看出，桉树纯林供试土壤全磷含量随模拟酸雨 pH 增加而依次增加，且各处理间差异性显著。pH 3.0 处理土壤全磷含量显著低于其他 3 个处理，各处理土壤全磷含量大小顺序为 CK ＞ pH 5.6 ＞ pH 4.0 ＞ pH 3.0。可见酸处理下桉树纯林土壤全磷含量与 CK 相比显著减少。桉树 + 红椎混交林各处理间供试土壤全磷含量随模拟酸雨 pH 变化没有显著变化，各处理间差异不显著。可见，酸雨淋溶状态下，桉树纯林土壤全磷更易流失，而酸雨对桉树 + 红椎混交林土壤全磷磷含量影响不大，说明桉树 + 红椎混交林土壤对全 P 保持能力强于桉树纯林土壤。



大写英文字母不同表示不同林分之间差异显著，
小写英文字母不同表示同一林分间差异显著
Different capital letters represent significant differences between different stands, while different lowercase letters represent significant differences among the same stand

图 5 模拟酸沉降下两种林分土壤全磷含量比较
Fig. 5 Comparison of total P content in soil of two stands under simulated acid deposition

2.2.5 酸沉降对土壤速效磷含量的影响 模拟酸沉降下两种林分土壤速效磷含量如图 6 所示，从图 6 可以看出，桉树纯林供试土壤速效磷含量随模拟酸雨 pH 增加而依次增加，pH 3.0 处理土壤速效磷含量显著低于其他 3 个处理，pH 5.6 和 CK 间差异不显著，但显著高于 pH 3.0 和 pH 4.0 处理。说明与 CK 相比，pH 5.6 的酸雨对桉树纯林速效磷含量无明显影响，而 pH 3.0 和 pH 4.0 处理显著降低了桉树纯林土壤速效磷含量，可见酸处理下桉树纯林土壤速效磷含量显著减少。桉树 + 红椎混交林各处理间供试土壤速效磷含量随模拟酸雨



大写英文字母不同表示不同林分之间差异显著，
小写英文字母不同表示同一林分间差异显著
Different capital letters represent significant differences between different stands, while different lowercase letters represent significant differences among the same stand

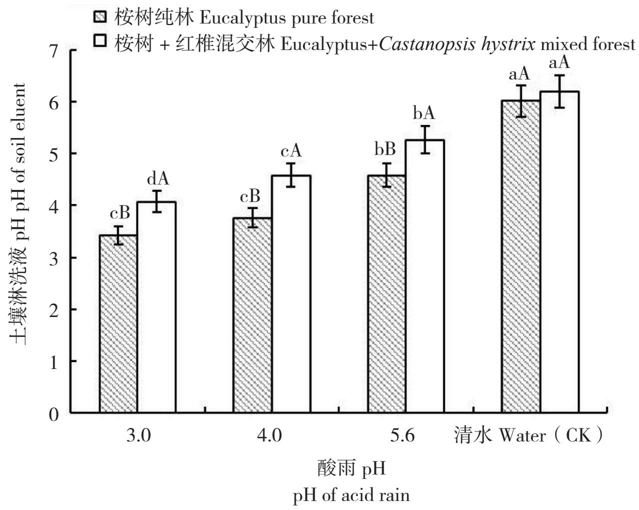
图 6 模拟酸沉降下两种林分土壤速效磷含量比较
Fig. 6 Comparison of available P content in soil of two stands under simulated acid deposition

pH 变化没有显著变化，各处理间差异不显著。说明酸雨对桉树 + 红椎混交林土壤速效磷含量无显著影响。

2.3 模拟酸雨对两林分土壤淋洗液 pH 值和养分含量的影响

2.3.1 酸沉降对两种林分土壤淋洗液 pH 值的影响 模拟酸沉降下桉树纯林和桉树 + 红椎混交林土壤淋洗液 pH 值变化如图 7 所示，两种林分土壤淋洗液 pH 值随模拟酸雨 pH 值的增加均表现出增加状态，桉树纯林除在 pH 3.0 和 pH 4.0 处理差异不显著外，其他处理间均表现极显著差异，桉树 + 红椎混交林各处理间均表现出极显著差异。淋洗液 pH 的高低在一定程度上反映了土壤的缓冲能力，两种林分土壤淋洗液 pH 在 CK 下差异不显著，其他 pH 酸雨淋洗后，桉树 + 红椎混交林土壤淋洗液 pH 极显著高于桉树纯林，说明桉树 +红椎混交林土壤缓冲酸雨的能力高于桉树纯林。

2.3.2 酸沉降对两种林分土壤淋洗液养分含量的影响 模拟酸沉降下桉树纯林和桉树 + 红椎混交林土壤淋洗液养分含量变化如图 8 和图 9 所示，两林分土壤淋洗液的全氮、铵态氮、硝态氮、全磷、速效磷含量随模拟酸雨 pH 的增加均表现出降低的规律，pH3.0 酸雨处理下，两种林分土壤淋洗液的养分含量最高，在桉树纯林中，pH3.0 处理下土壤淋洗液养分含量极显著高于其他 3 个处理，

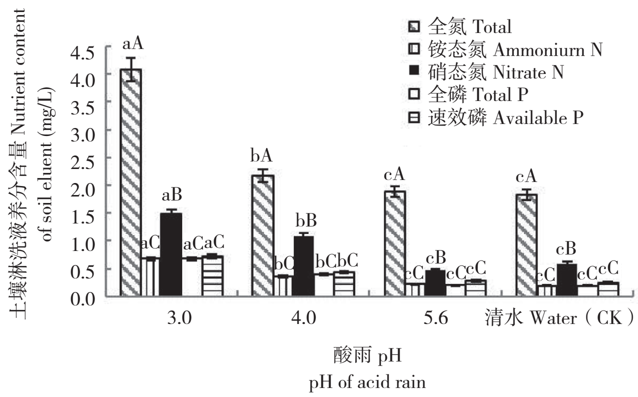


大写英文字母不同表示不同林分之间差异显著，
小写英文字母不同表示同一林分间差异显著
Different capital letters represent significant differences between different stands, while different lowercase letters represent significant differences among the same stand

图 7　模拟酸沉降下两种林分土壤淋洗液 pH 比较

Fig. 7　Comparison of pH of soil eluent from two stands under simulated acid deposition

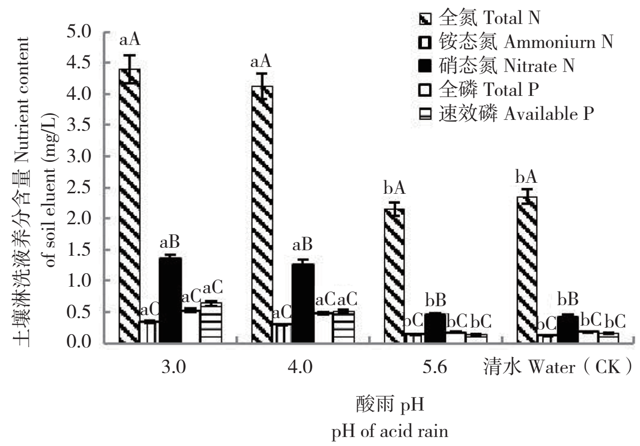
pH 5.6 处理和 CK 差异不显著，在桉树 + 红椎混交林混交林土壤中，pH 3.0 和 pH 4.0 处理下土壤淋洗液各养分含量变化差异不显著，但极显著高于 pH 5.6 处理和 CK。总体来看，两种林分土壤淋洗液养分含量变化表现为酸雨越严重，土壤淋洗出来的养分含量就越高。



大写英文字母不同表示不同养分之间差异显著，
小写英文字母不同表示同一养分间差异显著
Different capital letters represent significant differences among different nutrients, and different lowercase letters represent significant differences among the same nutrients

图 8　模拟酸沉降下桉树纯林土壤淋洗液养分含量比较

Fig. 8　Comparison of nutrient content in soil eluent of pure eucalyptus forest under simulated acid deposition



大写英文字母不同表示不同养分之间差异显著，
小写英文字母不同表示同一养分间差异显著
Different capital letters represent significant differences among different nutrients, and different lowercase letters represent significant differences among the same nutrients

图 9　模拟酸沉降下桉树 + 红椎混交林土壤淋洗液养分含量比较

Fig. 9　Comparison of nutrient content in soil eluent of mixed forest (eucalyptus + *Castanopsis hystrix*) under simulated acid deposition

3　讨论

刘莉等[27]通过室内模拟酸雨土柱淋溶实验，研究了酸雨作用下三峡库区 4 种典型土壤盐基离子的释放特点和释放机制，结果表明土壤 pH 值随酸雨 pH 值下降而下降；刘旭阳等[28]研究了模拟酸雨对福州平原稻田土壤酸化情况，结果表明，酸雨沉降加速了土壤酸化，这与本文得出的 pH 3.0 处理下桉树人工林土壤 pH 值显著降低的结论相符。张新明等[29]报道了模拟酸雨下荔枝园对 N 素变化的影响，结果表明模拟酸沉降下供试土壤各处理间全氮、硝态氮、铵态氮的含量随着模拟酸雨酸度的增强而依次增加。本研究结果表明，酸沉降下两种林分土壤全氮、硝态氮和铵态氮含量随酸雨酸度增强均呈现先增加后减少的趋势，弱酸性或者中性酸雨对土壤全氮、硝态氮和铵态氮具有促进作用，使土壤全氮、硝态氮和铵态氮显著增加，而强酸性降雨会使土壤全氮、硝态氮和铵态氮大量淋失，这可能与土壤内部结构有关：当酸雨为弱酸性或中性时，会促进土壤空气中的分子态氮转化成大量有机态氮和无机态氮，同时也会促进土壤中有机物质的水解、硝化作用和氨化作用，从而使土壤中氮素含量大量积累，积累量大于流失量，所以总体处于积累状态。而当酸雨为强酸性时，由于强酸性的酸雨会破坏土壤内部结构，抑制了氮转化和水解，同时强酸性降雨

也会影响土壤微生物的活动，抑制了微生物的分解作用，使微生物分解有机含氮化合物释放出氨的过程受到抑制，从而使土壤铵态氮含量增加缓慢，同时强酸性降雨又会使土壤中可溶性氨基酸大量流失，所以总体上会使土壤铵态氮处于大量淋失状态。铵态氮的减少抑制了土壤的氨在微生物作用下氧化为硝酸的过程，由于硝化细菌将氨氧化为硝酸的过程受到抑制，土壤硝态氮积累量小于流失量，所以使硝态氮总体上也减少。酸沉降下两种林分氮素降低率相比，可知桉树纯林全氮和铵态氮降低率远远大于桉树 + 红椎混交林，表明氮素在桉树纯林中的流失量大于桉树 + 红椎混交林，所以在酸雨严重地区可以营造桉树 + 红椎混交林，以减少氮素流失，使氮素能够更好地为植物吸收利用。

刘广深等[30]采用 pH 3.0、4.5 两种模拟酸雨与对照 pH 6.0 的雨水，湿润培育加磷后的土壤，结果表明模拟酸雨pH值愈低,有效磷衰减得愈快，酸雨加快土壤有效磷的衰减，这与本研究模拟酸沉降下桉树纯林土壤磷素随酸雨酸度的增加而减少，表现出酸沉降下磷素大量流失状态的结论一致，酸雨的淋溶大大增加了土壤中活性铝的含量，从而使磷的活性吸附点位增多，更多的磷酸根离子与活性铝离子配位吸附[31]，所以土壤中的磷素在酸雨处理后有所流失，雷波等[32]也表明酸雨引起重庆蔬菜土壤磷素淋失。而桉树 + 红椎混交林土壤磷素在不同酸度的酸雨沉降下没有显著变化，可知酸沉降对桉树 + 红椎混交林磷素无明显影响，说明桉树 + 红椎混交林土壤对素保持力较强，在造林方面我们可以选择在酸雨地区营造桉树 + 红椎混交林来缓解林木缺磷状况。

4 结论

（1）模拟酸雨沉降下两种林分土壤 pH、土壤淋洗液 pH 均随酸雨 pH 的降低而降低，桉树 + 红椎混交林土壤 pH 的平均下降幅度大于桉树纯林，说明桉树 + 红椎混交林对酸的缓冲能力大于桉树纯林。

（2）模拟酸雨沉降下两种林分土壤全氮、硝态氮和铵态 N 含量随酸雨 pH 减小均呈现先增加后减小的变化，同一 pH（pH 3.0）处理下，与 CK 相比，桉树纯林土壤全氮和铵态氮含量下降率远远大于桉树 + 红椎混交林，说明桉树 + 红椎混交林固定全氮和铵态氮的能力强于桉树纯林。

（3）模拟酸雨沉降下两种林分土壤全磷和速效磷变化规律有所差异，在桉树纯林中全磷和速效磷均呈现随酸雨 pH 的降低而降低，在桉树 + 红椎混交林中无显著变化，说明桉树 + 红椎混交林土壤磷素受酸雨影响较小，桉树 + 红椎混交林固磷能力较强。

参考文献（References）：

[1] 王明星，张仁健 . 大气气溶胶研究的前沿问题[J]. 气候与环境研究，2001(1):119–124. doi:10.3878/j.issn.1006–9585.2001.01.14.
WANG M X, ZHANG R J. Frontier problems in atmospheric aerosol research[J].*Climate and Environment Research*, 2001(1): 119–124. doi:10.3878/j.issn.1006–9585.2001.01.14.

[2] 杜裕，梁骏，梁驹 . 基于 GIS 广西酸雨区域分布及变化特征分析[J]. 环境工程，2012,30(S2):371–374.
DU Y, LIANG J, LIANG J.Analysis of regional distribution and variation characteristics of acid rain in Guangxi based on GIS[J]. *Environmental Engineering*, 2012, 30(S2):371–374.

[3] 董蕙青，黄海洪，高安宁，陈见，罗桂湘，郑凤琴 . 影响广西酸雨的大气环流特征分析[J]. 气象 ,2005(10):51–55. doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2005.10.013.
DONG H Q, HUANG H H, GAO A N,CHEN J, LUO G X,ZHENG F Q.Analysis of the atmospheric circulation characteristics affecting acid rain in Guangxi[J]. *Meteorology*, 2005(10): 51–55.doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2005.10.013.

[4] 刘厚田，张维平，沈英娃，杜晓明，邹晓燕，柳若安，马良清，杜世才,蓝康侯，罗韧，罗家菊，汤勤.重庆南山酸雨与马尾松衰亡的关系[J].环境科学学报,1988(3):331–339.
LIU H T, ZHANG W P, SHEN Y W, DU X M, ZOU X Y, LIU R A, MA L Q, DU S C, LAN K H, LUO N, LUO J J, TANG Q. The relationship between acid rain in Nanshan Mountain of Chongqing and the decline of *Pinus massoniana*[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 1988(3):331–339.

[5] 梁骏，郑有飞，李璐，麦博儒 . 模拟酸雨对油菜大田土壤酸化及 K, Na, Ca, Mg 溶出的影响[J]. 环境科学研究 ,2008(2):56–62.
LIANG J, ZHENG Y F, LI L, MAI B R. Effects of simulated acid rain on soil acidification and K, Na, Ca and Mg dissolution in rape field[J]. *Environmental Science Research*, 2008(2): 56–62.

[6] 许中坚，徐冬梅，刘广深，刘维屏 . 红壤中铝、锰和铁在酸雨作用下的释放特征[J]. 水土保持学报，2004(3):20–23,27. doi:10.3321/j.issn:1009–2242.2004.03.006.
XU Z J, XU D M, LIU G S, LIU W P. Release characteristics of aluminum, manganese and iron in red soilunder acid rain[J].*Journal of Soil and Water Conservation*, 2004(3): 20–23,27.doi:10.3321/j.issn:1009–2242.2004.03.006.

[7] 刘志彦，杨俊兴，周炎武，李韶山，彭逸生，陈桂珠 . 模拟酸雨对红树林底泥中营养元素及 Cu、Zn 分布的影响[J]. 生态学报，

2016,36(19):6209–6217.

LIU Z Y, YANG J X, ZHOU Y W, LI S S,PENG Y S, CHEN G Z.Effects of simulated acid rain on the distribution of nutrient elements and Cu and Zn in mangrove sediment［J］.*Journal of Ecology*, 2016, 36(19): 6209–6217.

［8］ 刘锋，李显芳.典型酸雨地区森林土壤中不同形态铝的分析［J］.环境科学研究,2003(6):40–42. doi:10.3321/j.issn:1001–6929.2003.06.012.

LIU F, LI X F. Analysis of aluminum species in forest soils in typical acid rain areas［J］. *Environmental Science Research*, 2003 (6): 40–42. doi:10.3321/j.issn:1001–6929.2003.06.012.

［9］ 易杰祥, 吕亮雪, 刘国道. 土壤酸化和酸性土壤改良研究［J］. 华南热带农业大学学报, 2006(1):23–28. doi:10.3969/j.issn.1674–7054.2006.01.005.

YI J X, LYU L X, LIU G D. Soil acidification and acid soil improvement［J］.*Journal of South China Tropical Agricultural University*, 2006(1): 23–28. doi:10.3969/j.issn.1674–7054.2006.01.005.

［10］ 万俊丽，周小苹，孙伟.模拟酸雨对土壤释放铝离子的影响［J］.安徽农学通报,2016,22(13):28–29,20. doi:10.3969/j.issn.1007–7731.2016.13.010.

WAN J L, ZHOU X P, SUN W. Effects of simulated acid rain on the release of aluminum ions from soil［J］. *Anhui Agricultural Bulletin*, 2016, 22 (13): 28–29,120. doi:10.3969/j.issn.1007–7731.2016.13.010.

［11］ 朱端卫, 成瑞喜, 刘景福, 刘武定.土壤酸化与油菜锰毒关系研究［J］.热带亚热带土壤科学, 1998(4):280–283.

ZHU D W, CHENG R X, LIU J F, LIU W D.The relationship between soil acidification and rapeseed manganese toxicity［J］. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1998(4): 280–283.

［12］ 祁述雄. 中国桉树［M］. 第 2 版. 北京: 中国林业出版社, 2002.

QI S X. Chinese Eucalyptu［M］. 2nd Edition. Beijing: China Forestry Press, 2002.

［13］ ANOLDR J, XIE Y J, MIDGLEY S J, LUO J Z, CHEN X F. Emergence and rise of eucalypt veneer production in China［J］. *International Forestry Review*,2013,15(1):33–47. doi:10.1505/146554813805927200.

［14］ TUMBULL J W. Eucalypt plantations［J］. *New Forests*,1999,17(1): 37–52.

［15］ 继钊, 李孝忠. 桉树人工林沃土保育与可持续经营思考［J］. 广西林业科学, 2017,46(2):233–236. doi:10.3969/j.issn.1006–1126.2017.02.025.

JI Z, LI X Z. Thoughts on fertile soil conservation and sustainable management of eucalyptus plantation［J］.*Guangxi Forestry Science*, 2017,46(2): 233–236. doi:10.3969/j.issn.1006–1126.2017.02.025.

［16］ LIISA U, MIKE S, ANTTI J L.Long–term changes in acidity and DOC in throughfall and soil water in finnish forests［J］. *Environ Monit Assess*,2014,186(11):7733–7752.doi:10.1007/s10661–014–3994–0.

［17］ BINKLEY D, DRISCOLL C T, ALLEN H L. Acidic Deposition and forests soils: context and case studies of the southeastern United States［M］. Beijing: China Environmental Science Press, 1996.

［18］ 唐仕明. 桉树与大叶相思混交造林初报［J］. 桉树科技协作动态, 1982(2):14–15.

TANG S M. Preliminary report on mixed afforestation of eucalyptus and acacia macrophylla［J］.*Trends of scientific and technological cooperation of Eucalyptus*, 1982 (2): 14–15.

［19］ 邓海燕，胡绍平，莫晓勇，刘丽婷.桉树人工混交林营造技术研究综述［J］.桉树科技,2017,34(4):53–58. doi:10.3969/j.issn.1674–3172.2017.04.010.

DENG H Y, HU S P, MO X Y, LIU L T. Summary of studies on the techniques of eucalyptus plantation［J］. *Eucalyptus Science and Technology*, 2017,34 (4):53–58. doi:10.3969/j.issn.1674–3172.2017.04.010.

［20］ 郭东升.相思人工林树皮解剖构造、化学特性与开发利用［D］. 南宁: 广西大学,2006.

GUO D S. Anatomical structure, chemical characteristics and development and utilization of bark of Acacia plantation［D］. *Nanning: Guangxi University*, 2006.

［21］ 邓荫伟, 李凤, 韦杰, 杨媛. 桂林市桉树、马尾松、杉木林下植被与土壤因子调查［J］. 广西林业科学 ,2010,39(3):140–143. doi:10.3969/j.issn.1006–1126.2010.03.006.

DENG Y W, LI F, WEI J, YANG Y. Investigation of vegetation and soil factors under eucalyptus,zmasson pine and Chinese fir forests in Guilin［J］. *Guangxi Forestry Science*, 2010,39(3): 140–143.doi:10.3969/j.issn.1006–1126.2010.03.006.

［22］ 谭玉金. 高峰林场不同树龄马占相思木材纤维的变异性研究［D］. 南宁: 广西大学 ,2007.

TAN Y J. Variability of Acacia mangium wood fibers at different tree ages in Gaofeng Forest Farm［D］. Nanning: Guangxi University, 2007.

［23］ 孙桂凯, 高沫, 黄亚, 杨庆, 王大洋, 佘璇. 广西 50 年降水结构时空变化特征分析［J］. 水电能源科学, 2016,34(9):1–4.

SUN G K, GAO M, HUANG Y, YANG Q, WANG D Y,SHE X. Spatial and temporal variation characteristics of precipitation structure in Guangxi in the past 50 years［J］. *Hydropower and Energy Science*, 2016, 34 (9): 1–4.

［24］ 程爱珍, 韦华红. 广西酸雨时空分布和季节变化特征分析［J］. 安徽农学, 2010(9):4683–4685. doi:10.3969/j.issn.0517–6611.2010.09.103.

CHENG A Z, WEI H H. Spatial–temporal distribution and seasonal variation of acid rain in Guangxi［J］. *Anhui Agronomy*, 2010(9):4683–4685. doi:10.3969/j.issn.0517–6611.2010.09.103.

［25］ 覃东才. 广西酸雨污染及变化趋势［J］. 中小企业科技, 2007,10: 274–275. doi:10.3969/j.issn.1674–0688.2007.10.139.

TAN D C.Acid rain pollution and its trend in Guangxi［J］. *Science and Technology of Small and Medium-sized Enterprises*, 2007, 10:274–275. doi:10.3969/j.issn.1674–0688.2007.10.139.

［26］ 洪江华. 模拟酸雨及氮沉降分别对亚热带典型树种凋落叶分解的影响［D］. 重庆 : 西南大学 ,2011.

HONG J H. Effects of simulated acid rain and nitrogen deposition on litter decomposition of typical subtropical tree species［D］. *Chongqing: Southwest University*, 2011.

［27］ 刘莉, 李晓红, 周志明, 林勇, 卢义玉. 模拟酸雨对三峡库区 4 种典型土壤酸化及盐基离子淋溶释放的影响［J］. 重庆大学学报（自然科学版）, 2007(8):63–69. doi:10.11835/j.issn.1000–582X.2007.08.015.

LIU L, LI X H, ZHOU Z M, LIN Y and LU Y Y . Effects of simulated acid rain on acidification and release of base ions from four typical soils in the Three Gorges Reservoir［J］. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2007 (8): 63–69. doi:10.11835/j.issn.1000–582X.2007.08.015.

［28］刘旭阳, 安婉丽, 金强, 陈晓旋, 陈优阳, 王维奇 . 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［J］. 水土保持学报, 2019,33(3):199–206.

LIU X Y, AN W L, JIN Q, CHEN X X, CHEN Y Y,WANG W Q. Effects of simulated acid rain on soil carbon, nitrogen and phosphorus contents and eco–chemometric characteristics of paddy fields in Fuzhou Plain［J］. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(3): 199–206.

［29］张新明, 张俊平, 刘素萍, 王长委, 刘彦红 . 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(6):18–21. doi:10.3321/j.issn:1009–2242.2006.06.005.

ZHANG X M, ZHANG J P, LIU S P, WANG C Wand LIU Y H. Effects of simulated acid rain on soil nitrogen transport and soil acidification in litchi orchard［J］. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006(6):18–21. doi:10.3321/j.issn:1009–2242.2006.06.005.

［30］刘广深, 许中坚, 徐文彬, 李克斌, 戎秋涛 . 模拟酸雨对土壤有效磷衰减的影响［J］. 矿物学报, 2002(1):35–38.doi:10.3321/j.issn:1000–4734.2002.01.006.

LIU G S, XU Z J, XU W B, LI K B, RONG Q T. Effects of simulated acid rain on soil available phosphorus attenuation［J］. *Journal of Minerals*, 2002(1): 35–38. doi:10.3321/j.issn:1000–4734.2002.01.006.

［31］鲁如坤, 时正元, 钱承梁 . 磷在土壤中有效性的衰减［J］. 土壤学报, 2000(3):323–329. doi:10.3321/j.issn:0564–3929.2000.03.005.

LU R K, SHI Z Y, QIAN C L.Attenuation of phosphorus availability in soil［J］. *Journal of Soil Science*, 2000 (3): 323–329. doi:10.3321/j.issn:0564–3929.2000.03.005.

［32］雷波, 王定勇, 包维楷. 模拟酸雨对土壤磷元素淋失的影响［J］. 农业环境科学学报, 2004(3):516–519. doi:10.3321/j.issn:1672–2043.2004.03.024.

LEI B, WANG D Y, BAO W K.Effects of simulated acid rain on soil phosphorus leaching［J］.*Journal of Agricultural Environmental Sciences*, 2004(3):516–519.doi:10.3321/j.issn:1672–2043.2004.03.024.

（责任编辑　白雪娜）