

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第8期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.08.003

论文标题： 长期截雨干旱后毛竹土壤养分含量、储量和化学计量变化

作　　者： 曹永慧，周 燕，方 庆，等

收稿日期： 2025-08-20

引文格式： 曹永慧,周燕,方庆,等.长期截雨干旱后毛竹土壤养分含量、储量和化学计量变化[J].中南林业科技大学学报,2026,46(8):26-36.

Cao Y H, Zhou Y, Fang Q, et al. Changes of soil nutrient content, storage and stoichiometry of *Phyllostachys edulis* after long-term throughfall exclusion[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):26-36.

相关论文推荐

Recommended articles

干旱对不同年龄毛竹光合作用日变化及环境因子的影响

Impact of drought on the diurnal variation of photosynthesis and environmental factors in *Phyllostachys edulis* leaves of different ages

毛竹种子发育过程中形态和生理特性变化

Changes in morphological and physiological characteristics of *Phyllostachys edulis* seeds during development

带状采伐对毛竹生物量和根系非结构性碳水化合物的影响

Effects of strip logging on the biomass and root non-structural carbohydrates of *Phyllostachys edulis*

不同钾水平对毛竹幼苗生长及生理指标的影响

Effects of different potassium levels on seedling growth and physiological indexes of *Phyllostachys edulis*

干旱胁迫下毛竹细胞壁形成相关miRNAs鉴定及差异分析

Identification and differential analysis of miRNAs associated with cell wall formation in *Phyllostachys edulis* under drought stress

毛竹phe-novel-miR276的克隆和功能分析

Cloning and functional analysis of phe-novel-miR276 in *Phyllostachys edulis*

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.08.003 http: //qks.csuft.edu.cn

长期截雨干旱后毛竹土壤养分含量、储量和化学计量变化

曹永慧[1]，周 燕[2]，方 庆[3]，赵紫晴[1]，李剑鸣[1,4]，周本智[1]

（1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所 浙江钱江源森林生态系统定位观测研究站，浙江 杭州 311400；
2. 浙江省建德市新安江林场，浙江 建德 311699；3. 浙江省建德市建德林场，浙江 建德 311604；
4. 东北林业大学 林学院，黑龙江 哈尔滨 150040）

摘 要：【目的】阐明毛竹 *Phyllostachys edulis* 土壤养分对长期干旱的响应，预测未来气候变化对毛竹林生态系统的影响，指导竹林生产经营管理实践。【方法】通过“顶棚法”模拟截雨干旱处理，测定分析无截雨处理（CK）和长期截雨干旱处理（DR）对毛竹林土壤有机碳、全氮、全磷含量和储量及其化学计量特征的影响。【结果】1）在毛竹土壤 0 ～ 50 cm 土层，DR 处理有效磷、水解性氮和有机碳含量以及 C/N、C/P 均显著低于 CK（$P < 0.05$），土壤全磷含量、pH 值低于 CK，全氮含量和 N/P 大于 CK；2）DR 和 CK 处理之间 0 ～ 10、10 ～ 30、30 ～ 50 cm 土层土壤养分含量差异不显著，DR 各土层 pH 值均低于 CK，其中 10 ～ 50 cm 土层 pH 值显著低于 CK（$P < 0.05$）；DR 处理 10 ～ 30 cm 土层 C/P 以及 10 ～ 50 cm 土层 C/N 均显著低于 CK（$P < 0.05$），30 ～ 50 cm 土层 N/P 显著高于 CK（$P < 0.05$）；3）DR 处理 0 ～ 50 cm 土层有机碳和全磷储量低于 CK，全氮储量高于 CK；4）CK 处理 pH 值与有机碳、全氮和全磷储量呈极显著正相关（$P < 0.01$），DR 处理 pH 值与 C/N 呈极显著负相关（$P < 0.01$），与 N/P 呈显著正相关（$P < 0.05$）；DR 处理全氮、全磷及有机碳含量均与 N/P 呈显著或极显著正相关，全磷含量与 C/N 呈显著负相关（$P < 0.05$）。【结论】土壤 pH 值、全磷含量和有效磷含量是干旱土壤氮磷平衡的主要影响因素。

关键词：毛竹；截雨干旱；土壤；碳氮磷储量；化学计量

中图分类号：S718.5 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)08-0026-11

Changes of soil nutrient content, storage and stoichiometry of *Phyllostachys edulis* after long-term throughfall exclusion

Cao Yonghui[1], Zhou Yan[2], Fang Qing[3], Zhao Ziqing[1], Li Jianming[1,4], Zhou Benzhi[1]

（1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry; Zhejiang Qianjiangyuan Forest Ecosystem Research Station, Hangzhou 311400, Zhejiang, China; 2. Xin’anjiang Forest Farm, Jiande 311699, Zhejiang, China; 3. Jiande Forest Farm, Jiande 311604, Zhejiang, China; 4. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract:【Objective】Elucidating the response of soil nutrients to long-term drought can better predict the impact of climate change on the ecosystem of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) forest in the future, and can guide the production and management practice of bamboo forest.【Method】This study measured and analyzed the response of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus content and storage, as well as their stoichiometric characteristics, to no throughfall exclusion (CK) and long-term throughfall exclusion (DR) in bamboo forests using the “ceiling method” for rain interception.【Result】The results showed that the average value of available phosphorus content, hydrolytic nitrogen and organic carbon content, as well as the average soil C/N and C/P values in the 0-50 cm soil layer of drought soil were significantly lower than those in the control soil ($P < 0.05$). The total phosphorus content and average pH value of drought soil were slightly lower than those in the control, while the total nitrogen content and N/P value of soil were higher than those in the control . There was no significant difference in soil nutrient content between drought and control treatments in each soil layer of 0-10 cm, 10-30 cm, and 30-50 cm. The soil pH values in all drought soil layers were lower than those in the control, with

收稿日期（Received）：2025-08-20 **修订日期**（Revised）：2025-11-01

基金项目：国家自然科学基金项目（32171774）；浙江省基础公益研究计划项目（LGF20C160001）。

第一作者：曹永慧（fjcyh77@sina.com），副研究员，博士。 **通信作者：**周本智（benzhi_zhou@126.com），研究员，博士。

引文格式：曹永慧 , 周燕 , 方庆 , 等 . 长期截雨干旱后毛竹土壤养分含量、储量和化学计量变化 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(8):26-36.

Cao Y H, Zhou Y, Fang Q, et al. Changes of soil nutrient content, storage and stoichiometry of *Phyllostachys edulis* after long-term throughfall exclusion[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):26-36.

the pH value in the 10-50 cm range being significantly lower than that of the control ($P < 0.05$). The C/P value in the 10-30 cm drought soil layer and the C/N value in the 10-50 cm drought soil layer were significantly lower than those in the control ($P < 0.05$), while the N/P value in the 30-50 cm soil layer was significantly higher than that in the control ($P < 0.05$). Drought has increased the "surface aggregation" phenomenon of soil nutrient content and the chemical stoichiometry. The organic carbon storage and total phosphorus storage in the 0-50 cm soil layer under drought were lower than the control, while the total nitrogen storage in the soil was higher than the control. Relevant analysis shows that the pH value of the control soil is significantly positively correlated with organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus storage ($P < 0.01$), while the pH value of soil under drought stress is only significantly negatively correlated with C/N and significantly positively correlated with N/P. The total nitrogen, total phosphorus, and organic carbon content in soil under drought are significantly or extremely significantly positively correlated with N/P ($P < 0.05$ or $P < 0.01$), while the total phosphorus content is significantly negatively correlated with C/N($P < 0.05$).【Conclusion】The soil pH value, total phosphorus, and available phosphorus content are the main influencing factors of nitrogen and phosphorus balance in soils under drought.

Keywords: *Phyllostachys edulis*; throughfall exclusion; soil; C, N, P storage; stoichiometry

碳（C）、氮（N）和磷（P）元素是森林生态系统养分循环的关键成分 [1]，是维持土壤质量的重要指标 [2]。土壤碳库在森林生态系统碳库中占比最高，在森林碳循环中具有重要作用 [2-3]。土壤有机碳（Soil organic carbon，SOC）是土壤碳库的重要组成部分，是土壤肥力和生产力的重要影响因素 [2,4]。土壤 N、P 是植物生长和生产力的重要常量养分 [5]，其养分水平与土壤有机碳循环紧密相关 [6]。土壤 C、N 和 P 化学计量表征土壤内部养分循环特征，是森林生态系统功能的核心，对森林群落组成、结构和土壤肥力具有重要影响，是预测森林养分的重要参考指标 [7-8]。土壤 C/N 较小表明土壤有机质矿化速率较快，土壤 C/P 较小表明土壤 P 有效性高，N/P 可作为 N 饱和的诊断指标 [9]。

在气候变化背景下，干旱加剧对森林生态系统产生重大影响 [1,10-11]。目前，大部分研究主要集中在植物地上部分或根系对干旱的响应 [12-14]，探讨长期干旱下土壤 C、N 和 P 养分有效性、储量与化学计量特征之间关联的研究较少 [15]。厘清土壤养分对干旱的响应有利于预测未来气候变化尤其是干旱对森林生态系统的潜在影响 [16]。

毛竹 *Phyllostachys edulis* 是我国分布最广的重要竹资源 [5]，毛竹林现有面积 467.78 万 hm^2，主要分布在亚热带地区 [17]，面积逐年增加 [18-19]。毛竹林土壤有机碳库占其生态系统总碳库的 77% 左右 [20]，其动态变化与生产经营方式密切相关，与土壤物理化学特性有关 [21-22]，还受气候因素影响 [4]。与集约经营管理相比，粗放经营的毛竹林固碳潜力更高 [21]。然而，在当前高温干旱气候日益频发的背景下，针对毛竹林土壤养分、碳氮磷储量及化学计量对干旱的响应研究较少。从化学计量学角度探讨干旱下毛竹林土壤养分现状及限制情况，可为其可持续经营和土壤科学管理提供参考。因此，本研究以粗放经营的毛竹林为对象，通过“顶棚法”模拟截雨干旱处理，探讨长期干旱后毛竹土壤碳氮磷含量、储量及其化学计量的响应，为毛竹土壤管理和可持续生产经营提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况及试验材料

研究区属于浙江钱江源森林生态系统定位观测研究站庙山坞辅站，位于杭州市庙山坞自然保护区（119°56′～120°02′E，30°03′～30°06′N）。年平均气温 16.1 ℃，年平均降水量 1 441.9 mm。研究区毛竹林为 20 世纪 60 年代种植，一直处于粗放经营状态。毛竹林下灌木和草本较少，凋落物平均厚度 2.0 cm，土壤有机碳、氮和有效磷含量分别为 38.44 g/kg、2.85 g/kg 和 6.03 mg/kg。2013 年 8 月下旬，在坡度、坡向和坡位相似的毛竹林中设置 6 个 20 m×20 m 固定样地，调查记录样地海拔、土层厚度等基本情况。固定样地郁闭度 0.95，林分密度 3 875 株 /hm^2，毛竹平均胸径（9.8±0.3）cm，平均树高（13.2±0.5）m[23]。

1.2　截雨干旱试验

2014 年 7 月，在 3 个无截雨处理（CK）的 20 m×20 m 样地和 3 个截雨干旱处理（DR）的 20 m×20 m 样地内，每个样地选择 1 个 10 m×10 m 的样方用于试验。将 DR 样地 3 个样方内生长稀疏的灌木去除，用“顶棚法”模拟截雨干旱 [23]。为去除边缘效应，保证干旱面积为 10 m×10 m，在 DR 样地内距离地面上方 1.5 m 处用 PVC 防水板材搭建截雨大棚（面积为 11 m×11 m）实现人工截雨模拟干旱（年平均降水量为 1 441.9 mm，因此该降水量也为样地年截雨量）。为了去除截雨棚对毛竹凋落物正常归还土壤的影响，每月上旬和下旬收集棚顶凋落物，称质量后均匀撒于棚下土壤表面。

为防止雨水渗漏，在竹秆周围一圈与 PVC 板材结合处的缝隙用塑料布和胶水黏合，每年定期更换塑料布并重新粘合。为阻止样地周围水分侧渗，在样地周围开挖深约 50 cm、宽约 20 cm 的壕沟，并沿着壕沟埋入深度为 50 cm 的铁皮。CK 处理仅在样地周围开挖相似壕沟，不做其他处理。分别于 2014、2023 年对毛竹各样地林分生长进行调查，不同干旱处理下各试验样地的基本情况见表 1。

表 1 不同干旱处理毛竹试验样地概况 †

Table 1 Location and natural conditions of sample plots in the initial stage of experiment for *Phyllostachys edulis*

年份 Year	样地号 Plot No.	海拔 Altitude /m	林分密度 Forest density /（株·hm^{-2}）	郁闭度 Crown density	坡位 Slope position	坡向 Aspect	坡度 Slope gradient /(°)	平均胸径 Average DBH /cm	平均树高 Average tree height /m
2014	1	103	3 820	0.93	中下	南坡	10	12.8±0.9	13.8±1.1
	2	100	3 740	0.92	中下	南坡	18	12.5±0.7	14.4±0.5
	3	105	3 725	0.88	中下	东南坡	12	12.9±0.6	14.2±0.7
	4	110	3 900	0.97	中下	南坡	10	12.7±1.3	13.3±0.3
	5	108	3 800	0.94	中下	南坡	18	12.4±1.1	13.0±0.8
	6	112	3 750	0.95	中下	东南坡	12	13.1±0.4	12.7±1.1
2023	1	103	3 223	0.60	中下	南坡	10	10.1±1.6	13.0±0.5
	2	100	2 562	0.55	中下	南坡	18	10.4±2.3	12.6±1.7
	3	105	2 893	0.54	中下	东南坡	12	10.4±1.5	12.0±0.9
	4	110	6 694	0.85	中下	南坡	10	10.9±1.8	13.4±1.5
	5	108	6 200	0.88	中下	南坡	18	12.5±1.6	14.0±1.1
	6	112	5 600	0.80	中下	东南坡	12	12.8±0.9	14.3±1.3

† 样地 1 ～ 3：DR 处理；样地 4 ～ 6：CK 处理。DBH：胸径。
Sample plot 1-3: Drought treatment; Plot 4-6: Control treatment. DBH: Diameter at breast height.

1.3 样品采集与处理

2023 年 11 月中旬毛竹孕笋长鞭期间（截雨干旱 9 a），在 DR 和 CK 处理各样方内，按照“S”形选取 3 个点位分别挖取 1 个土壤剖面，每个剖面依据土壤深度分 3 层（0 ～ 10、10 ～ 30、30 ～ 50 cm）采集土样，利用环刀法在各土层取原状土，测定并计算土壤容重。每个样方采集土样 9 个，不同干旱处理共采集土样 54 个。去除土壤样品中的所有石块、根系残体后，将土样分别装袋标记后带回实验室进行分析。自然风干土壤后，将相同样方内采集的 3 份土样分别按照土层深度均匀混合，用“四分法”取部分风干土并进行编号，用于土壤养分的分析与测定。所有土样研磨后过 0.15 mm 孔径筛，测定土壤有机碳、全氮、全磷含量和 pH 值 [24]。

1.4 土壤理化指标测定方法

采用环刀法和烘干法测定土壤容重与含水量等指标 [25]，采用 H_2SO_4-$K_2Cr_2O_7$ 法测定有机碳含量，用半微量凯氏定氮法测定全氮含量，经 $HClO_4$-H_2SO_4 消解后，采用钼锑抗比色法测定全磷含量，采用电位法（土水比为 1∶2.5）测定土壤 pH 值 [26]。DR 样地的土壤含水量显著低于 CK 样地，其中 CK 样地 0 ～ 10、10 ～ 30、30 ～ 50 cm 土层土壤平均含水量分别为（11.88±1.06）%、（11.86±1.36）%、（13.19±0.45）%，DR 样地 0 ～ 10、10 ～ 30、30 ～ 50 cm 土层土壤平均含水量分别为（5.15±0.58）%、（6.39±0.84）%、（7.02±0.45）%。截雨干旱处理后的试验初期（2014 年 11 月中旬），采集样地土壤进行土壤养分含量测定。

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2021 和 SPSS 22.0 软件进行数据统计分析，运用单因素方差分析（One-way ANOVA）和多重比较法（LSD）检验毛竹土壤各指标间的差异显著性（$P < 0.05$），通过多因素方差分析检验干旱处理、林分密度对土壤养分指标的影响显著性（$P < 0.05$）。同时，对土壤养分含量、储量及化学计量特征值进行 Pearson 相关性分析。土壤碳氮磷储量计算公式参考文献 [27]。

2 结果与分析

2.1 截雨干旱后毛竹土壤养分与化学计量的变化

由表 2 可知，毛竹林同一土层的土壤全氮、全磷、有效磷、水解性氮和有机碳含量在 DR 和 CK 处理

间的差异均不显著；DR 处理仅 0 ～ 10 cm 土层有效磷含量高于 CK，仅 10 ～ 30 cm 土层全磷含量高于 CK。DR 处理 10 ～ 30、30 ～ 50 cm 土层 pH 值显著低于 CK（$P < 0.05$），0 ～ 10 cm 土层 pH 值低于 CK 但不显著。DR 处理 10 ～ 30、30 ～ 50 cm 土层 C/N 显著低于 CK（$P < 0.05$），10 ～ 30 cm 土层 C/P 显著低于 CK，0 ～ 10、10 ～ 30 cm 土层 N/P 低于 CK 但不显著，30 ～ 50 cm 土层 N/P 显著高于 CK（$P < 0.05$）。

结果表明，DR、CK 处理土壤全氮、有效磷、水解性氮和有机碳含量均随土层深度递增而呈现逐渐下降的趋势。DR 处理毛竹土壤全氮、有效磷、水解性氮和有机碳含量在不同土层之间差异均显著（$P < 0.05$）；CK 处理 0 ～ 10、10 ～ 30 cm 土层的全氮、水解性氮和有机碳含量均与 30 ～ 50 cm 土层差异显著（$P < 0.05$），各土层之间有效磷含量差异显著（$P < 0.05$）。

随着土层深度增加，DR 处理土壤全磷含量逐渐下降，0 ～ 10、10 ～ 30 cm 土层全磷含量均与 30 ～ 50 cm 土层差异显著（$P < 0.05$）；CK 处理土壤全磷含量随土层深度的增加先降后升。DR 处理土壤 pH 值随土层深度的增加先降后升，各土层 pH 值差异不显著；CK 处理土壤 pH 值随土层深度的增加逐渐升高，且在 0 ～ 10、30 ～ 50 cm 土层差异显著（$P < 0.05$）。DR 处理土壤 C/N、C/P 和 N/P 随土层深度的增加逐渐下降，不同土层之间的 N/P 均差异显著（$P < 0.05$），0 ～ 10 cm 土层 C/P 与 10 ～ 30、30 ～ 50 cm 土层差异显著（$P < 0.05$）。CK 土壤 C/N、C/P 随土层深度的增加先升后降，N/P 则呈逐渐下降趋势，30 ～ 50 cm 土层 C/P 和 N/P 均与 0 ～ 10、10 ～ 30 cm 土层差异显著，30 ～ 50 cm 土层 C/N 与 0 ～ 10 cm 土层差异显著（$P < 0.05$）。

表 2　不同干旱处理毛竹土壤养分和化学计量随土层深度的变化 †

Table 2　Soil nutrients and stoichiometry of *P. edulis* under different drought treatments

处理 Treatment	土壤深度 Soil depth /cm	全氮含量 Total nitrogen content /(g·kg^{-1})	全磷含量 Total phosphorus content /(g·kg^{-1})	有效磷含量 Available Phosphorus content /(mg·kg^{-1})	水解性氮含量 Hydrolyzable nitrogen content /(mg·kg^{-1})	有机碳含量 Organic carbon content /(g·kg^{-1})
DR	0 ～ 10	2.49±1.03 Aa	0.32±0.07 Aa	2.38±0.36 Aa	199.36±30.85 Aa	24.21±5.61 Aa
	10 ～ 30	1.98±0.96 Ba	0.31±0.08 Aa	1.58±0.57 Ba	131.61±45.17 Ba	17.62±6.69 Ba
	30 ～ 50	1.67±0.79 Ca	0.29±0.05 Ba	1.02±0.21 Ca	111.53±39.29 Ca	14.73±5.28 Ca
CK	0 ～ 10	2.61±0.64 Aa	0.34±0.02 Aa	2.10±0.07 Aa	199.63±0.99 Aa	24.48±0.12 Aa
	10 ～ 30	2.08±0.11 Aa	0.30±0.02 Aa	1.92±0.20 Ba	189.53±0.83 Aa	23.94±0.81 Aa
	30 ～ 50	1.30±0.44 Ba	0.31±0.03 Aa	1.31±0.25 Ca	99.85±22.16 Ba	13.50±3.51 Ba
处理 Treatment	土壤深度 Soil depth /cm	pH 值 pH value	C/N	C/P	N/P	
DR	0 ～ 10	4.24±0.11 Aa	10.13±1.96 Aa	75.66±0.68 Aa	7.62±1.54 Aa	
	10 ～ 30	4.23±0.14 Ab	9.15±1.05 Ab	56.77±6.71 Bb	6.29±1.45 Ba	
	30 ～ 50	4.26±0.04 Ab	9.11±1.14 Ab	49.90±8.77 Ba	5.58±1.66 Ca	
CK	0 ～ 10	4.40±0.03 Ba	9.68±2.41 Ba	72.93±4.33 Aa	7.72±1.47 Aa	
	10 ～ 30	4.51±0.08 ABa	11.56±1.02 Aa	80.91±3.17 Aa	7.04±0.89 Aa	
	30 ～ 50	4.58±0.03 Aa	10.50±0.88 ABa	44.00±15.65 Ba	4.27±1.85 Bb	

† 不同大写字母表示相同处理不同土层之间差异显著（$P < 0.05$），不同小写字母表示相同土层不同干旱处理间差异显著（$P < 0.05$）。下同。
Different capital letters indicate significant differences between different soil layers in the same treatment ($P < 0.05$), while different lowercase letters indicate significant differences between different drought treatments in the same soil layer ($P < 0.05$). The same below.

2.2　截雨干旱后毛竹土壤养分储量、化学计量的变化

由表 3 可知，CK处理土壤容重随着土层深度的增加逐渐增加，DR 处理则先增加后下降，两者在不同土层间差异均不显著。DR 处理 30 ～ 50 cm 土层土壤容重低于 CK，说明长期截雨干旱处理下，30 ～ 50 cm 土层土壤的透气性、透水性有所改善，可能有利于毛竹鞭根向下生长。DR 处理土壤有机碳储量随土层深度的增加而逐渐降低，且各土层间差异显著（$P < 0.05$）；CK 处理土壤有机碳储量则先增加后下降，10 ～ 30、30 ～ 50 cm 土层有机碳储量差异显著（$P < 0.05$）。DR 和 CK 处理全氮储量随着土层深度的增加逐渐降低，且两者在 0 ～ 10、30 ～ 50 cm 土层之间差异均显著。DR 处理土壤全磷储量随着土层深度的增加先增加后下降，CK 则先下降后升高，DR 和 CK 处理各土层全磷储量差异均不显著。

由表 4 可知，DR 处理土壤有机碳、有效磷、水解性氮含量以及 C/N、C/P 均显著低于 CK（$P <$

0.05），而土壤全磷含量、pH 值低于 CK 但不显著，土壤全氮含量和 N/P 均大于 CK。CK 和 DR 处理土壤 C/N/P 分别为 65∶6∶1 和 61∶7∶1，高于我国平均值（60∶5∶1）。DR 处理土壤有机碳储量和全磷储量低于 CK，而土壤全氮储量高于 CK，且差异均不显著。

表 3 不同干旱处理毛竹林各土层土壤 C、N、P 储量

Table 3 Soil C, N, P storage in different soil layers in bamboo forest under different drought treatments

处理 Treatment	土壤深度 Soil depth /cm	土壤容重 Soil bulk density /(g·cm^{-3})	有机碳储量 Organic carbon stock /(t·hm^{-2})	全氮储量 Total nitrogen stock /(t·hm^{-2})	全磷储量 Total phosphorus stock /(t·hm^{-2})
DR	0 ～ 10	1.110±0.018 Aa	53.66±11.61 Aa	5.51±2.21 Aa	0.71±0.15 Aa
	10 ～ 30	1.299±0.195 Aa	44.45±10.48 Ba	4.96±1.71 ABb	0.78±0.09 Aa
	30 ～ 50	1.282±0.242 Aa	36.49±6.40 Ca	4.08±1.21 Bb	0.73±0.01 Aa
CK	0 ～ 10	1.090±0.251 Aa	53.42±12.54 ABa	5.53±0.08 Aa	0.73±0.13 Aa
	10 ～ 30	1.186±0.062 Aa	56.72±1.03 Aa	4.93±0.52 Ab	0.70±0.01 Aa
	30 ～ 50	1.314±0.119 Aa	35.07±6.02 Bb	3.37±0.85 Bb	0.82±0.16 Ab

表 4 不同干旱处理毛竹土壤碳氮磷储量及化学计量

Table 4 Soil carbon, nitrogen, and phosphorus storage and stoichiometry of *P. edulis* plantations under different drought treatments

处理 Treatment	全氮含量 Total nitrogen content /(g·kg^{-1})	全磷含量 Total phosphorous content /(g·kg^{-1})	有效磷含量 Available phosphorus content /(mg·kg^{-1})	水解性氮含量 Hydrolyzable nitrogen content /(mg·kg^{-1})	有机碳含量 Organic carbon content /(g·kg^{-1})	有机碳储量 Organic carbon stock /(t·hm^{-2})
DR	2.04±0.93 a	0.31±0.07 a	1.66±0.68 b	147.50±46.02 b	18.85±5.86 b	134.60±28.49 a
CK	2.00±0.40 a	0.32±0.01 a	1.77±0.42 a	163.00±54.93 a	20.64±0.86 a	145.20±5.49 a
处理 Treatment	全氮储量 Total nitrogen stock /(t·hm^{-2})	全磷储量 Total phosphorus stock /(t·hm^{-2})	pH 值 pH value	C/N	C/P	N/P
DR	14.55±5.14 a	2.22±0.24 a	4.24±0.01 a	9.46±1.38 b	60.78±5.39 b	6.49±1.55 a
CK	13.83±1.46 a	2.25±0.30 a	4.50±0.09 a	10.58±1.44 a	65.95±4.83 a	6.34±1.41 b

2.3 截雨干旱后毛竹土壤养分含量、储量和化学计量随林分密度的变化

不同干旱处理分别设置高、中、低 3 个林分密度梯度，DR 处理高、中、低林分密度分别为 3 000 ～ 3 400、2 700 ～ 3 000 和 2 300 ～ 2 600 株 /hm^2，CK 处理高、中、低林分密度分别为 6 400 ～ 6 800、6 000 ～ 6 400 和 5 500 ～ 6 000 株 /hm^2。由表 5 可知，随着林分密度的增加，DR 处理除土壤 C/N 呈显著下降外（$P < 0.05$），其他土壤养分含量及其化学计量特征和 pH 值均显著增加（$P < 0.05$）。随着林分密度的增加，CK 处理土壤全氮、水解性氮和有机碳含量先降后升，其中不同林分密度的土壤全氮含量差异显著，中等密度林分的土壤水解性氮含量与高、低密度林分差异显著，高密度林分的土壤有机碳含量与中、低密度林分差异显著。随着林分密度的增加，CK 处理土壤有效磷含量和 C/N 均先升后降，且在不同林分密度间均差异显著（$P < 0.05$）；C/P 和 N/P 随着林分密度的增加先降后升，且在不同林分密度间均差异显著（$P < 0.05$）。CK 处理仅土壤全磷含量和 pH 值在不同林分密度间差异不显著。

相同林分密度下，不同干旱处理的土壤养分含量存在差异。DR 处理高、中密度林分的土壤全氮含量显著高于 CK（$P < 0.05$），低密度林分则低于 CK；低密度林分的土壤全磷含量显著低于 CK（$P < 0.05$），其他林分密度下与 CK 差异不显著；中、低密度林分的土壤有机碳和水解性氮含量均显著低于 CK，高密度林分下差异不显著；高密度林分的土壤有效磷含量均显著高于 CK，中、低密度林分则显著低于 CK（$P < 0.05$）；高、中密度林分的土壤 C/N 均显著低于 CK，低密度林分低于 CK 但差异不显著；各密度林分的土壤 C/P 均低于 CK，仅低密度林分差异显著；高、中密度林分的土壤 N/P 均高于 CK，中密度林分差异显著，低密度林分显著低于 CK（$P < 0.05$）；各密度林分的土壤 pH 值均显著低于 CK（$P < 0.05$）。

由表 6 可知，随着林分密度的增加，DR 处理土壤全氮、全磷和有机碳储量均显著增加，而土壤容重则随着林分密度的增加而显著下降（$P < 0.05$）。CK 处理土壤全氮、全磷和有机碳储量在不同密度林分之间均差异显著（$P < 0.05$），土壤全磷储量和有机碳储量均随着林分密度的增加先升后降，土壤全氮储量随着林分密度的增加先降后升，土壤容重则随着林分密度的增加先升后降。相同林分密度下，土壤养分储量在 DR 与 CK

处理之间差异显著（$P < 0.05$）。DR 处理高密度林分的土壤全氮、全磷和有机碳储量均显著高于 CK，低密度林分的土壤全氮、全磷和有机碳储量均显著低于 CK；而中密度林分的土壤全氮储量显著高于 CK，全磷和有机碳储量则显著低于 CK（$P < 0.05$）。

表 5　不同干旱处理毛竹土壤养分含量、化学计量随林分密度的变化 †

Table 5　Changes in soil nutrient content and stoichiometry of moso bamboo under different drought treatments with stand densities

处理 Treatment	林分密度 Stand density	全氮 Total nitrogen /(g·kg^{-1})	全磷 Total phosphorus /(g·kg^{-1})	有机碳 Organic carbon /(g·kg^{-1})	水解性氮 Hydrolyzable nitrogen /(mg·kg^{-1})	有效磷 Available phosphorus /(mg·kg^{-1})
DR	高	2.70±0.50 Aa	0.35±0.02 Aa	22.99±4.89 Aa	174.68±42.05 Aa	1.93±0.74 Aa
	中	2.04±0.42 Ba	0.31±0.01 Ba	18.85±4.74 Bb	147.50±26.02 Bb	1.66±0.45 Bb
	低	1.39±0.33 Cb	0.26±0.01 Cb	14.71±4.18 Cb	120.32±25.19 Cb	1.39±0.51 Cb
CK	高	2.28±0.73 Ab	0.31±0.04 Aa	21.25±4.39 Aa	167.79±44.25 Aa	1.65±0.44 Cb
	中	1.72±0.63 Cb	0.32±0.01 Aa	20.03±6.80 Ba	158.21±24.36 Ba	1.90±0.36 Aa
	低	2.00±0.66 Ba	0.31±0.02 Aa	20.64±5.19 Ba	163.00±34.59 Aa	1.77±0.24 Ba

处理 Treatment	林分密度 Stand density	C/N	C/P	N/P	pH 值 pH value
DR	高	8.49±0.23 Cb	64.59±3.72 Aa	7.59±0.67 Aa	4.31±0.03 Ab
	中	9.46±0.58 Bb	60.78±3.34 Ba	6.49±0.83 Ba	4.24±0.01 Bb
	低	10.44±0.93 Aa	56.97±6.31 Cb	5.40±0.77 Cb	4.17±0.04 Cb
CK	高	9.57±0.42 Ca	69.36±4.05 Aa	7.33±0.62 Aa	4.51±0.06 Aa
	中	11.60±0.16 Aa	62.53±5.67 Ca	5.35±1.07 Cb	4.48±0.05 Aa
	低	10.58±0.53 Ba	65.95±9.42 Ba	6.32±0.86 Ba	4.50±0.09 Aa

† 不同大写字母表示同一干旱处理下不同密度间差异显著（$P < 0.05$），不同小写字母表示相同密度下不同干旱处理之间差异显著（$P < 0.05$）。下同。Different capital letters indicate significant differences in density among the same drought treatments ($P < 0.05$), while different lowercase letters indicate significant differences between different drought treatments under the same density ($P < 0.05$). The same below.

表 6　毛竹不同干旱处理土壤养分储量随林分密度的变化

Table 6　Changes in soil nutrient storage of moso bamboo under different drought treatments with stand densities

处理 Treatment	林分密度 Stand density	土壤容重 Soil bulk density /(g·cm^{-3})	有机碳储量 Organic carbon stock /(t·hm^{-2})	全氮储量 Total nitrogen stock /(t·hm^{-2})	全磷储量 Total phosphorus stock /(t·hm^{-2})
DR	高	1.12±0.03 Ca	51.58±10.43 Aa	6.06±1.07 Aa	0.80±0.06 Aa
	中	1.23±0.10 Ba	44.87±8.59 Bb	4.85±0.72 Ba	0.74±0.04 Bb
	低	1.34±0.19 Aa	38.15±6.18 Cb	3.64±0.37 Cb	0.68±0.07 Cb
CK	高	1.12±0.18 Ca	47.11±3.99 Cb	4.95±0.68 Ab	0.68±0.05 Cb
	中	1.27±0.13 Aa	49.70±6.65 Aa	4.27±0.37 Cb	0.82±0.11 Aa
	低	1.20±0.11 Bb	48.40±1.67 Ba	4.61±0.11 Ba	0.75±0.06 Ba

由表 7 可知，干旱对土壤化学计量 C/P、pH 值影响不显著，对土壤养分含量、C/N、N/P 影响显著（$P < 0.05$）；林分密度对土壤养分含量及化学计量的影响显著，林分密度和干旱交互作用对土壤养分含量及化学计量的影响显著（$P < 0.05$）。林分密度对土壤养分储量的影响显著（$P < 0.05$），干旱和林分密度的交互作用对土壤养分储量的影响显著（$P < 0.05$）。

2.4　截雨干旱后毛竹土壤理化性质与碳氮磷化学计量和储量的相关性

由表 8 可见，CK 处理土壤 pH 值与碳氮磷储量均呈极显著正相关（$P < 0.01$），而有机碳、水解性氮含量与碳氮磷储量均呈极显著负相关（$P < 0.01$），有效磷含量与全氮储量呈极显著负相关（$P < 0.01$），与碳磷储量均呈显著负相关（$P < 0.05$）。CK 处理土壤有机碳含量与 C/P 呈显著正相关（$P < 0.05$），与 N/P 呈极显著正相关（$P < 0.01$）；全氮含量与 N/P 呈极显著正相关（$P < 0.01$），与 C/N 呈显著负相关（$P < 0.05$）。DR 处理土壤理化性质与碳氮磷储量无显著相关性，土壤有机碳、全磷和全氮含量与 N/P 呈极显著正相关（$P < 0.01$），土壤 pH 值与 N/P 呈显著正相关（$P < 0.05$），与 C/N 呈极显著负相关（$P < 0.01$）。综上可知，与 CK 处理相比，长期截雨干旱加强了毛竹土壤全磷、水解氮和有效磷含量对 N/P 的显著正相关作用，降低了土壤 pH 值对碳氮磷储量的正相关作用。

表 7 干旱和林分密度对土壤养分含量、化学计量及储量影响的显著性 †

Table 7 Significant effects of drought and stand density on soil nutrient content, chemical stoichiometry, and storage

土壤养分指标 Soil nutrient indicators		显著性 Significance		
		林分密度 Stand density	干旱 Drought	干旱 × 林分密度 Drought×Stand density
土壤养分含量 Soil nutrient content	全氮 Total nitrogen	0.000	0.000	0.000
	全磷 Total phosphorous	0.000	0.023	0.000
	有机碳 Organic carbon	0.000	0.005	0.000
	水解性氮 Hydrolyzable nitrogen	0.000	0.016	0.000
	有效磷 Available phosphorus	0.000	0.000	0.000
土壤化学计量 Soil stoichiometry	C/N	0.000	0.001	0.000
	C/P	0.000	0.170	0.000
	N/P	0.000	0.000	0.000
	pH 值 pH value	0.000	0.194	0.000
土壤养分储量 Soil nutrient storage	土壤容重 Soil bulk density	0.000	0.014	0.000
	有机碳储量 Organic carbon stock	0.000	0.000	0.000
	全氮储量 Total nitrogen stock	0.000	0.000	0.000
	全磷储量 Total phosphorus stock	0.000	0.000	0.000

表 8 不同干旱处理毛竹土壤理化性质与碳氮磷储量和化学计量的相关性分析 †

Table 8 Correlation analysis of soil physical and chemical properties with C, N and P storage and stoichiometry in *P. edulis* plantations under different drought treatments

处理 Treatment	组分 Component	土壤容重 Soil bulk density	pH 值 pH value	全氮含量 Total nitrogen content	全磷含量 Total phosphorus content	有机碳含量 Organic carbon content	水解性氮含量 Hydrolyzable nitrogen	有效磷含量 Available phosphorus content
CK	有机碳储量	0.541	0.955**	−0.787	−0.805	−0.979**	−0.983**	−0.854*
	全氮储量	0.375	0.967**	−0.643	−0.803	−0.948**	−0.957**	−0.949**
	全磷储量	0.538	0.917**	−0.797	−0.739	−0.995**	−0.995**	−0.815*
	C/N	0.988**	0.432	−0.917*	−0.550	−0.426	−0.416	−0.010
	C/P	−0.162	−0.568	0.490	0.240	0.875*	0.864*	0.610
	N/P	−0.923**	−0.622	0.984**	0.609	0.709**	0.698	0.274
DR	有机碳储量	0.465	0.296	−0.111	0.089	−0.396	−0.588	−0.685
	全氮储量	0.297	0.455	0.065	0.263	−0.222	−0.429	0.541
	全磷储量	0.588	0.185	−0.227	−0.031	−0.508	−0.690	0.775
	C/N	0.231	−0.954**	−0.758	−0.864*	−0.519	−0.302	−0.198
	C/P	−0.870*	0.173	0.550	0.388	0.781	0.906*	0.941**
	N/P	−0.848*	0.821*	0.981**	0.927**	0.993**	0.937**	0.890*

† * 表示 $P < 0.05$ 的显著性；** 表示 $P < 0.01$ 的显著性。* Indicating significance of $P < 0.05$; ** Significance of $P < 0.01$.

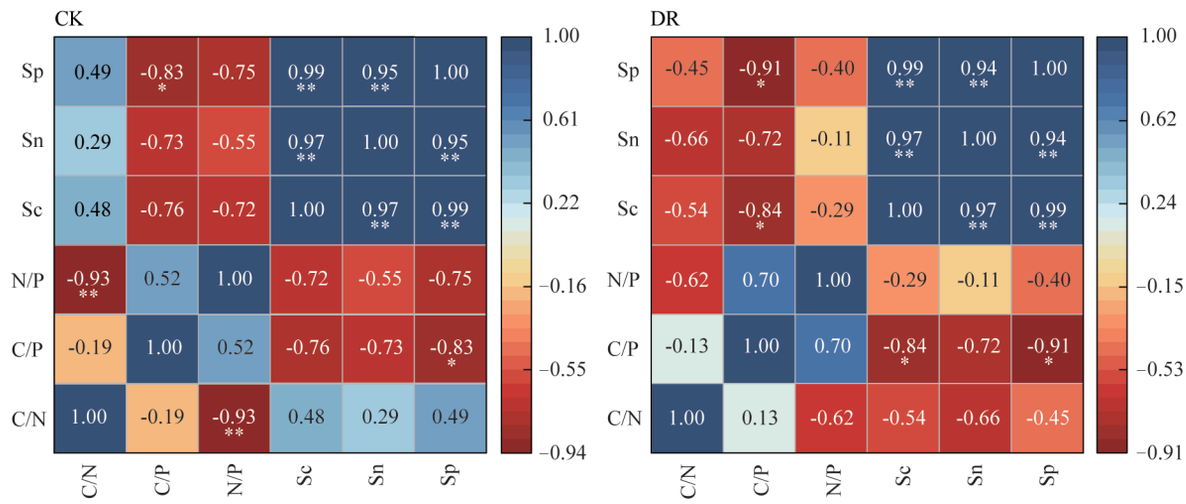
2.5 截雨干旱后毛竹土壤化学计量对碳氮磷储量的影响

由图 1 可知，CK 处理土壤 C/P、N/P 与土壤碳氮磷储量均呈负相关，其中 C/P 与土壤磷储量呈显著负相关（$P < 0.05$），C/N 与土壤碳氮磷储量呈正相关。DR 处理土壤 C/N、C/P、N/P 与土壤碳氮磷储量呈负相关，其中 C/P 与土壤碳和磷储量均呈显著负相关（$P < 0.05$），表明 DR 处理较低的 C/P 和 C/N 利于土壤碳氮磷储量的积累。DR 和 CK 处理土壤碳氮磷储量之间均呈极显著正相关（$P < 0.01$）。CK 处理土壤氮储量与磷储量呈极显著正相关（$P < 0.01$），DR 处理土壤氮储量与磷储量呈极显著正相关（$P < 0.01$）。

3 讨 论

3.1 干旱对毛竹土壤养分含量、储量和化学计量的影响

干旱对植物生长 [28]、生态系统生产力 [29] 和其他生态系统功能 [1] 产生重要影响。毛竹是我国重要的经济、生态竹种，具有强大的固碳潜力 [30]。但目前关于长期干旱（干旱 9 a）对毛竹土壤碳氮磷养分含量、储量及其化学计量影响的研究较少。干旱会对土壤养分可用性产生深远影响，其中对



Sc、Sn 和 Sp 分别代表有机碳储量、全氮储量和全磷储量。* 表示 $P < 0.05$ 的显著性，** 表示 $P < 0.01$ 的显著性。
Sc, Sn and Sp represent organic carbon storage, total nitrogen storage, and total phosphorus storage, respectively. * significantly indicates significance at $P < 0.05$; ** indicates significance at $P < 0.01$.

图 1　不同干旱处理毛竹土壤碳氮磷储量与其化学计量的相关性

Fig. 1　The correlation between carbon, nitrogen, and phosphorus storage and their stoichiometry in soil of moso bamboo under different drought treatments

氮和磷有效性的影响尤为显著，了解树种适应干旱过程如何作用于土壤养分有效性，是探究气候变化对森林结构和功能影响的关键 [16]。有研究认为，干旱降低了土壤中的有机碳和氮的浓度，这是植物减少有机物输入的结果 [31]，这与本研究结论一致。DR 处理 0 ～ 50 cm 土层土壤有机碳含量均显著低于 CK（$P < 0.05$），0 ～ 30 cm 土层有机碳含量也低于 CK。干旱引起的土壤有机碳浓度下降，可能是因为干旱通过降低树木光合作用速率减少了植物对土壤的碳输入 [31-32]。本研究通过分析 DR 和 CK 处理毛竹林分密度对土壤养分的潜在影响发现，毛竹土壤养分含量及化学计量受干旱和林分密度的交互作用的影响均显著（$P < 0.05$）。DR 处理中、低密度林分的土壤有机碳含量均显著低于 CK，高密度林分的土壤有机碳含量与 CK 差异不显著，反映了干旱导致土壤有机碳含量下降，可能还受干旱和林分密度的间接交互影响。DR 处理下，除土壤 C/N 随着林分密度的增加显著下降外（$P < 0.05$），其他土壤养分含量及其化学计量特征和 pH 值均随着林分密度的增加而显著增加。CK 处理土壤养分含量及化学计量则随着林分密度的增加呈先降后升或先升后降趋势，因养分指标不同而异。结果表明，毛竹土壤养分含量及化学计量在 DR 与 CK 处理之间的差异显著性受林分密度影响较大。因此，在干旱毛竹林的经营管理中，应考虑林分密度与干旱的交互效应。

有研究认为，长期干旱条件下，土壤氮含量下降，而土壤碳含量则趋于增加 [33-34]。土壤 C/N/P 比率可以影响植物营养状态，调节植物生长，反映土壤肥力 [7,35]。树木生长的营养供应和需求间的平衡会随着植物群落的发展而变化 [36]。Mariotte 等 [37] 认为，防雨棚降低了水的可用性，干旱条件下植物对氮的吸收减少，增加了土壤有效氮含量，从而提高了土壤 N/P。本研究在分析毛竹林分密度对干旱处理的潜在影响时发现，DR 处理高、中密度林分的土壤全氮含量显著高于 CK，而低密度林分的全氮含量低于 CK；同样，DR 处理高、中密度林分的土壤 N/P 高于 CK，在中密度林分与 CK 差异显著，在低密度林分显著低于 CK。这一结果说明，在探讨干旱对林分土壤氮素含量的影响时，应考虑林分密度的间接效应。已有研究发现，干旱降低了森林生态系统的土壤总氮浓度，但不会降低总磷浓度 [15,38]。本研究中，DR 处理 0 ～ 50 cm 土层的水解性氮、有效磷含量以及土壤 C/N、C/P 均显著低于 CK（$P < 0.05$），全磷含量也低于 CK，表明长期截雨干旱处理加快了毛竹 0 ～ 50 cm 土层的有机质矿化速率，提升了磷有效性。

已有研究结果表明，土壤氮和磷水平对土壤有机碳循环作用明显 [6]。本研究中，CK 处理土壤 C/N、C/P 和 N/P 分别为 10.58、65.95 和 6.34，DR 处理土壤 C/N、C/P 和 N/P 分别为 9.46、60.78 和 6.49，CK 和 DR 处理土壤 C/N/P 的平均值分别为 65∶6∶1 和 61∶7∶1，均高于我国平均值（60∶5∶1）。结果表明，长期截雨干旱处理增强了毛竹土壤理化性状与土壤养分化学计量的显著相关性。与 CK 处理相比，DR 处理土壤 pH 值对 C/N 的极显著负相关作用和对 N/P 的显著正相关作用均有所增强。这一结果说明，改善长期干旱条件下毛竹土壤的

pH 值，可促使其土壤有机质矿化速率同步加快。DR 处理土壤 C/N、C/P、N/P 等养分化学计量与土壤碳氮磷储量均呈负相关，其中 C/P 与土壤碳和磷储量均为显著负相关，说明长期截雨干旱后毛竹土壤较低的 C/N、C/P 有利于土壤氮磷储量积累。而 DR 处理土壤 pH 值与 N/P 呈显著正相关，与 C/N 呈极显著负相关，表明长期截雨干旱后适当提高土壤 pH 值，可能有利于毛竹土壤氮磷储量积累。粗放经营毛竹林主要受氮素限制，施加氮肥有利于生物量碳积累 [39-40]。本研究中，DR 处理土壤 N/P 高于 CK，说明毛竹经历长期干旱后土壤养分含量降低，全氮含量增加。但目前毛竹干旱样地土壤仍然处于氮素亏缺状态，需要施加氮肥来缓解长期干旱的负面影响。

土壤养分储量可以反映土壤肥力和土壤质量 [27]。Li 等 [4] 研究表明，0 ～ 60 cm 土层毛竹林土壤碳储量平均值为 104.14 t/hm^2，高于我国土壤碳储量平均值（80 t/hm^2）。本研究中，DR 处理 0 ～ 50 cm 土层的土壤碳储量为 134.60 t/hm^2，CK 处理为 145.20 t/hm^2，二者均高于我国土壤碳储量平均值。CK 和 DR 处理毛竹土壤平均磷储量分别为 2.25、2.22 t/hm^2，远低于我国磷储量平均值（6 t/hm^2）。

3.2 干旱对不同土层土壤养分含量、储量和化学计量特征的影响

随着干旱持续时间的延长，土壤氮含量增加，这可能是长期干旱条件下植物对氮的竞争减弱，导致土壤氮含量增加的结果 [1,32]。在本研究中，DR 处理 0 ～ 50 cm 土层土壤全氮含量高于 CK，30 ～ 50 cm 土层的土壤全氮含量增加，但有机碳和全磷含量有所下降，这可能与长期截雨干旱后毛竹地上部分生长对氮的竞争减少有关。这也充分表明，长期截雨干旱后，毛竹土壤养分含量会随土壤深度的增加而降低。Sardans 等 [32] 发现，干旱条件下土壤深度会对土壤养分产生影响，持续干旱会提高 0 ～ 15 cm 土层的碳浓度，并降低 15 ～ 30 cm 土层的 C/N。已有研究表明，干旱使蒙古松 *Pinus sylvestris* 0 ～ 20 cm 土层的土壤有机碳、全氮、全磷含量降低，N/P 也随之降低，干旱加剧导致土壤养分缺乏和土壤退化 [16]。

Zhang 等 [16] 研究表明，在 0 ～ 10 cm 土层中，土壤氮磷循环受干旱强度增加的影响会随之加重，总氮的减少幅度大于总磷的减少幅度。本研究中，DR 处理降低了毛竹 0 ～ 10 cm 土层的土壤全氮和全磷含量，提升了有效磷含量；土壤全磷含量在 0 ～ 10、30 ～ 50 cm 土层低于 CK，在 10 ～ 30 cm 土层高于 CK；土壤有效磷含量在 0 ～ 10 cm 土层高于 CK，在 10 ～ 50 cm 土层低于 CK。结果表明，干旱对毛竹土壤磷含量的影响受土壤深度的影响较明显。较多研究表明，在氮含量较低的土壤中，氮素有效性是限制土壤微生物量的重要因素 [19]。在本研究中，DR 处理土壤有效磷含量在 0 ～ 10 cm 土层高于 CK，但经过长期截雨干旱后，土壤是否通过增加表土层的有效磷含量改善土壤微生物生物量，仍需要进一步研究探讨。

有研究表明，毛竹林土壤有机碳含量会随着土壤深度的增加显著减少 [4]，粗放经营毛竹的土壤有机碳含量表现为随土壤深度的增加而降低 [3]。与其研究结果相似，本研究中 CK 处理各土层的土壤有机碳含量随着土壤深度的增加而逐渐下降。已有研究发现，0 ～ 10、10 ～ 30 和 30 ～ 50 cm 土层的土壤有机碳储量随着土壤深度的增加表现为先升高后下降 [3]，本研究中 CK 处理的土壤有机碳储量随着土壤深度的增加同样表现为先增加后下降，有机碳储量在 10 ～ 30、30 ～ 50 cm 土层之间差异显著；DR 处理的土壤有机碳储量随土壤深度的增加而降低，且各土层间差异显著。随着土壤深度增加，DR 处理的土壤 C/N、C/P 和 N/P 逐渐下降，说明与 0 ～ 10 cm 的表土层相比，10 ～ 50 cm 较深土层的磷有效性和有机质矿化速率更高，这或许与毛竹鞭根生长和生物量沿土壤深度的垂直分布格局有关，但仍需要进一步研究。

4 结 论

除土壤全氮和全磷含量外，土壤水解性氮、有效磷和有机碳含量及化学计量特征在 DR 与 CK 处理间均差异显著，但受土壤深度影响，各土层土壤养分含量在 DR 与 CK 处理间差异表现为不显著，而化学计量在个别土层的 DR 与 CK 处理间差异显著。与 CK 处理相比，DR 处理在 10 ～ 30 cm 土层具有更高的磷有效性，在 10 ～ 50 cm 土层具有更快的有机质矿化速率。长期截雨干旱处理增强了毛竹土壤碳氮磷养分及其化学计量比的“土壤表聚现象”。与 CK 处理相比，DR 处理削弱了土壤养分含量和 pH 值与 0 ～ 50 cm 土层的土壤碳氮磷储量的相关性，提升了土壤 pH 值对碳氮磷化学计量特征的影响。长期干旱还会增强土壤全磷含量与土壤 N/P 的正相关程度，以及土壤全磷含量与 C/N 值的负相关程度。因此，长期截雨干旱后，提高土壤 pH 值可提升土壤有机质矿化速率，对于干旱胁迫下的毛竹土壤管理，应重视土壤 pH 值的调控，进而调控土壤有机质矿化速率，解决土壤磷亏缺问题。

参考文献：

[1] Sun Y, Liao J H, Zou X M, et al. Coherent responses of terrestrial C∶N stoichiometry to drought across plants, soil, and microorganisms in forests and grasslands[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020,292-293:108104.

[2] 杨传宝 , 倪惠菁 , 苏文会 , 等 . 经营措施对毛竹林土壤不同组分有机碳、氮及化学结构的影响 [J]. 应用生态学报 , 2020,31(1):25-34.
Yang C B, Ni H J, Su W H, et al. Effects of management measures on organic carbon, nitrogen and chemical structure of different soil fractions in *Phyllostachys edulis* plantations[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2020,31(1):25-34.

[3] 李翀 . 毛竹林碳积累特征与碳汇功能经营调控研究 [D]. 北京 : 北京林业大学 ,2018:6.
Li C. Research on the management regulation and control of carbon accumulation characteristic and carbon sink function in moso bamboo forest[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2018:6.

[4] Li S Y, Zhang A, Song H Q, et al. The dominant factor affecting soil organic carbon in subtropical *Phyllostachys edulis* forests is climatic factors rather than soil physicochemical properties[J]. Forests,2023,14:958.

[5] Tang X L, Xia M P, Guan F Y, et al. Spatial distribution of soil nitrogen, phosphorus and potassium stocks in moso bamboo forests in subtropical China[J]. Forests,2016,7:267.

[6] Liu Z P, Shao M A, Wang Y Q. Spatial patterns of soil total nitrogen and soil total phosphorus across the entire Loess Plateau region of China[J]. Geoderma,2013,197-198:67-78.

[7] Zechmeister-Boltenstern S, Keiblinger K M, Mooshammer M, et al. The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transformations[J]. Ecological Monographs, 2015,85(2):133-155.

[8] 吴宇萍 , 丁明军 , 张华 , 等 . 高寒草甸重度退化阶段土壤碳氮磷生态化学计量特征及驱动因素 [J]. 环境科学 ,2024,45(10): 6050-6060.
Wu Y P, Ding M J, Zhang H, et al. Characteristics and drivers of soil carbon, nitrogen, and phosphorus ecological stoichiometry at the heavy degradation stage of the alpine meadow[J]. Environmental Science,2024,45(10):6050-6060.

[9] 曹雯婕 , 李玉强 , 陈银萍 , 等 . 科尔沁沙地不同土地利用类型土壤化学计量特征 [J]. 应用生态学报 ,2022,33(12):3312-3320.
Cao W J, Li Y Q, Chen Y P, et al. Soil stoichiometry characteristics under different land use types in the Horqin sandy land, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2022,33(12): 3312-3320.

[10] Ault T R. On the essentials of drought in a changing climate[J]. Science,2020,368:256-260.

[11] Shi Z, Thomey M L, Mowll W, et al. Differential effects of extreme drought on production and respiration: synthesis and modeling analysis[J]. Biogeosciences,2014,11:621-633.

[12] López R, Javier C F, Martin-Stpaul N K, et al. Coordination of stem and leaf traits define different strategies to regulate water loss and tolerance ranges to aridity[J]. New Phytologist,2021,230: 497-509.

[13] Vargas G G, Brodribb T J, Dupuy J M, et al. Beyond leaf habit: generalities in plant function across 97 tropical dry forest tree species[J]. New Phytologist,2021,232:148-161.

[14] 高小敏 , 刘世荣 , 王一 , 等 . 穿透雨减少和氮添加对毛竹叶片和细根化学计量学的影响 [J]. 生态学报 ,2021,41(4): 1440-1450.
Gao X M, Liu S R, Wang Y, et al. Effects of throughfall reduction and nitrogen addition on stoichiometry of leaf and fine root in *Phyllostachys edulis* forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(4):1440-1450.

[15] Tauca F, Houle D, Dupuch A, et al. Microtopographic refugia against drought in temperate forests: lower water availability but more extensive fine root system in mounds than in pits[J]. Forest Ecology and Management,2020,476:118439.

[16] Zhang J L, Lin G G, Zhao Q, et al. High adaptability of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to drought-induced soil nutrient deficiency[J]. Ecological Processes,2022,11:39.

[17] 国家林业和草原局 . 中国森林资源报告 [M]. 北京 : 中国林业出版社 ,2019:3-5.
National Forestry and Grassland Administration. China forest resources report[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019:3-5.

[18] 季海宝 , 庄舜尧 , 张厚喜 , 等 . 我国毛竹林生态系统碳储量的地带性差异 [J]. 生态环境学报 ,2013,22(1):1-5.
Ji H B, Zhuang S Y, Zhang H X, et al. Zonality variation of carbon storage in *Phyllostachys edulis* plantation ecosystems in China[J]. Ecology and Environmental Sciences,2013,22(1):1-5.

[19] 牛利敏 , 苗倞婧 , 彭定聪 , 等 . 长期粗放经营毛竹林土壤微生物群落演变特征 [J]. 林业科学研究 ,2017,30(2):285-292.
Niu L M, Miao J J, Peng D C, et al. Variation patterns of soil microbial community of *Phyllostachys edulis* stands under long-term extensive management[J]. Forest Research,2017,30(2): 285-292.

[20] 张厚喜 , 庄舜尧 , 季海宝 , 等 . 我国南方毛竹林生态系统碳储量的估算 [J]. 土壤 ,2014,46(3):413-418.
Zhang H X, Zhuang S Y, Ji H B, et al. Estimating carbon storage of moso bamboo forest ecosystem in southern China[J]. Soils,2014,46(3):413-418.

[21] Yang C B, Ni H J, Zhong Z K, et al. Changes in soil carbon pools and components induced by replacing secondary evergreen broadleaf forest with moso bamboo plantations in subtropical China[J]. Catena,2019,180:309-319.

[22] Liu X X, Luan Y N, Dai W, et al. Factors affecting soil organic carbon in a *Phyllostachys edulis* forest[J]. Journal of Forestry Research,2019,30:1487-1494.

[23] 周雨飞 , 袁慧平 , 周燕 , 等 . 干旱对不同年龄毛竹光合作用日变化及环境因子的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(4):130-138.
Zhou Y F, Yuan H P, Zhou Y, et al. Impact of drought on the diurnal variation of photosynthesis and environmental factors in *Phyllostachys edulis* leaves of different ages[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(4):130-138.

[24] 何高迅 , 王越 , 彭淑娴 , 等 . 滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征 [J]. 生态学报 ,2020,40(13):4425-4435.
He G X, Wang Y, Peng S X, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks and ecological stoichiometry characteristics of different vegetation restorations in degraded mountainous area of central Yunnan, China[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(13): 4425-4435.

[25] 国家林业和草原局 . 森林土壤分析方法 [M]. 北京 : 中国标准出版社 ,2000:334.
National Forestry and Grassland Administration. Forest soil analysis method[M]. Beijing: China Standard Press,2000:334.

[26] 鲍士旦 . 土壤农化分析 [M].3 版 . 北京 : 中国农业出版社 , 2000:25-114.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M].3rd ed. Beijing: China Agriculture Press,2000:25-114.

[27] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis[J]. Global Change Biology,2002,8: 345-360.

[28] Mcdowell N G, Beerling D J, Breshears D D, et al. The interdependence of mechanisms underlying climate-driven vegetation mortality[J]. Trends in Ecology & Evolution,2011, 26(10):523-532.

[29] Farooq M, Hussain M, Wahid A, et al. Drought stress in plants: an overview[M]Plant Responses to Drought Stress. Berlin: Springer, 2012:1-33.

[30] 孙韵 , 厉月桥 , 刘仁 , 等 . 不同经营方式下毛竹林物种多样性及碳汇功能差异性 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(11): 115-126.
Sun Y, Li Y Q, Liu R, et al. Differences of species diversity and carbon sink capacity of moso bamboo forest under different management modes[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(11):115-126.

[31] Khalili B, Ogunseitan O A, Goulden M L, et al. Interactive effects of precipitation manipulation and nitrogen addition on soil properties in California grassland and shrubland[J]. Applied Soil Ecology,2016,107:144-153.

[32] Boyer J S. Photosynthesis at low water potentials[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences,1976,273:501-512.

[33] Sardans J, Peñuelas J, Estiarte M. Changes in soil enzymes related to C and N cycle and in soil C and N content under prolonged warming and drought in a Mediterranean shrubland[J]. Applied Soil Ecology,2008,39:223-235.

[34] Gurevitch J, Koricheva J, Nakagawa S, et al. Meta-analysis and the science of research synthesis[J]. Nature,2018,555:175-182.

[35] Nie X Q, Li C B, Ren L N, et al. Different responses of soil element contents and their stoichiometry (C∶N∶P) to different grazing intensity on the Tibetan Plateau shrublands[J]. Frontiers in Environmental Science,2023,11:1170507.

[36] Liu J T, Gu Z J, Shao H B, et al. N-P stoichiometry in soil and leaves of *Pinus massoniana* forest at different stand ages in the subtropical soil erosion area of China[J]. Environmental Earth Sciences,2016,75:1091.

[37] Mariotte P, Canarini A, Dijkstra F A. Stoichiometric N∶P flexibility and mycorrhizal symbiosis favour plant resistance against drought[J]. Journal of Ecology,2017,105(4):958-967.

[38] Sardans J, Urbina I, Grau O, et al. Long-term drought decreases ecosystem C and nutrient storage in a Mediterranean holm oak forest[J]. Environmental and Experimental Botany, 2020,177:104135.

[39] 顾鸿昊 , 翁俊 , 孔佳杰 , 等 . 粗放和集约经营毛竹林叶片的生态化学计量特征 [J]. 浙江农林大学学报 ,2015,32(5):661-667.
Gu H H, Weng J, Kong J J, et al. Ecological stoichiometry of *Phyllostachys edulis* leaves with extensive and intensive management [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2015,32(5):661-667.

[40] 陈本学 , 刘广路 , 蔡春菊 , 等 . 不同施肥方式对毛竹林碳储量及土壤理化性质的影响 [J]. 四川农业大学学报 ,2018,36(3): 323-328.
Chen B X, Liu G L, Cai C J, et al. Effects of fertilization modes on carbon reserves and soil physi-chemical properties in a *Phyllostachys edulis* forest[J]. Journal of Sichuan Agricultural University,2018,36(3):323-328.

[本文编校：戴欧琳]