

埋管通气对雷竹林土壤氧气体积分数的影响

郭益昌¹, 庄舜尧², 胡昱彦¹, 桂仁意¹

(1. 浙江农林大学 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300; 2. 中国科学院 南京土壤研究所 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏 南京 210008)

摘要:【目的】为改善土壤氧气体积分数提供方法手段, 以实现退化雷竹 *Phyllostachys violascens* 林的可持续经营。【方法】通过田间试验, 利用原位氧测定方法, 分析了埋管通气法对不同通气处理(覆盖不透气 M, 覆盖通气 MA, 不覆盖通气 A 及不覆盖不透气对照 ck)下雷竹林土壤氧气体积分数的影响。【结果】覆盖会造成雷竹林根系的低氧胁迫, 土壤埋管通气能有效提高雷竹林土壤氧气体积分数。在土壤 40 cm 深的水平方向上, 相比未通气地块, 土壤氧气体积分数提高了 2.20%~5.25%; 在土壤垂直方向上, 可提高各土层土壤氧气体积分数 0.78%~4.98%。在覆盖处理时, 埋管通气可提高土壤氧气体积分数 1.26%~4.71%。在土壤含水饱和时, 通气处理可提高土壤氧气体积分数 0.69%~7.58%。【结论】土壤埋管通气法能有效提高雷竹林土壤氧气体积分数, 在雷竹林高效经营方面有较好的应用前景。图 4 表 3 参 28

关键词: 森林土壤学; 雷竹林; 埋管; 通气; 土壤氧气体积分数; 覆盖; 土壤含水量

中图分类号: S714 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2020)01-0069-07

Soil oxygen content of *Phyllostachys violascens* with pipe-buried aeration

GUO Yichang¹, ZHUANG Shuniao², HU Yuyan¹, GUI Renyi¹

(1. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China;

2. State Key Laboratory of Soil & Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] Limitations to growth and biomass production are expected due to low soil oxygen content. To increase soil oxygen content of *Phyllostachys violascens* stands under various managements and to provide a new technique for soil aeration and sustainable management of *P. violascens* are necessary. [Method] A pipe-buried aeration method was adopted. An in-situ measurement was used to detect soil oxygen content of various managed bamboo stands. There are split-plot design with four treatments (M: mulching without aeration, MA: mulching with aeration, A: no mulching with aeration, and ck: no mulching without aeration) and 3 replications. We studied the response of soil oxygen content after pipe-buried aeration to four levels of soil depth (V_{10} , V_{20} , V_{30} and V_{40} , respectively) and four levels of distance to pipe (H_{15} , H_{30} , H_{45} and H_{60} , respectively). [Result] The mulching technique could lead to soil hypoxia, but the pipe-buried aeration improved soil oxygen significantly ($P < 0.05$). In the soil layer below 40 cm, soil oxygen content increased 2.20%–5.25% compared to the control ($P < 0.05$). For the vertical level in various layers, soil oxygen content increased 0.78%–4.98% ($P < 0.05$). When the mulching technique was adopted, the pipe-buried aeration method increased soil oxygen content 1.26%–4.71% ($P < 0.05$). When water saturated, the aeration method increased soil oxygen content 0.69%–7.58% ($P < 0.05$). [Conclusion] The pipe-buried aeration method was an effective measure for increasing bam-

收稿日期: 2018-12-27; 修回日期: 2019-04-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41671296); 浙江省科技计划项目(2017C02016); 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室自主研究资助项目(ZY20180302)

作者简介: 郭益昌, 从事竹林培育与利用研究。E-mail: 619153939@qq.com。通信作者: 桂仁意, 教授, 博士, 从事竹林培育与利用研究。E-mail: gry@zafu.edu.cn

boo soil oxygen content, and it could be promising with sustainable bamboo management. [Ch, 4 fig. 3 tab. 28 ref.]

Key words: forest soil science; *Phyllostachys violascens* forests; pipe-buried; aeration; soil oxygen content; mulching; soil water content

水、肥、气、热是保障土壤肥力和植物健康生长的四大要素，其中氧气是土壤气体重要部分，在植物的生命活动中起着重要作用^[1]。土壤中氧浓度会影响植物根系对土壤中营养元素的吸收，进而影响地上部分的生长。土壤缺氧则会影响植物的呼吸作用、根的伸长和蒸腾作用^[2]，同时，还会降低植物对疾病的抗性^[3-4]。雷竹 *Phyllostachys violascens* 是优良的笋用竹种，其覆盖栽培是浙江省“一亩山万元钱”的十大经营模式之一。林地有机材料覆盖能使竹笋萌发显著提前，从而极大地提高了竹林经济效益^[5]。但由于不合理的连年覆盖、过量的化学肥料使用、经营不善等导致雷竹林退化严重^[6]。在覆盖条件下，土壤通透性下降，供氧能力不足，影响到雷竹林地下鞭根系统的正常生长，造成笋产量和质量的下降。有研究表明，地下鞭根结构与笋产量密切相关^[7]。立地条件好，土壤疏松通气的雷竹林地，地下鞭根粗壮，健壮芽数量多；反之，土壤黏湿通气不畅、板结、排水性能差的林地，则会导致地下鞭根生长不良，笋芽空壳甚至发霉^[8]。因此，提高土壤氧是雷竹林可持续经营的重要手段。目前，改善土壤缺氧的研究已有较多的报道^[9-10]，如通过耕作改善土壤结构^[11]，提高排灌管理技术^[12]，还有机械加氧^[13]、化学溶氧^[14-15]和微纳米气泡曝气^[16-17]等都是改善土壤缺氧的研究。但是，这些研究在雷竹林中的应用还鲜有报道。本研究旨在采用土壤埋管通气的方法来提高雷竹林土壤氧气体积分数，比较不同通气处理下土壤水平和垂直方向上氧气体积分数的变化，为改善土壤氧气体积分数提供方法手段，并为退化雷竹林恢复及可持续经营提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省杭州市临安区太湖源镇潘母岗的浙江农林大学雷竹林基地(30°11'47"N, 119°37'40"E)，该区属北亚热带季风气候区，地形以丘陵山地为主，年均降水量为 1 614 mm，年降水日为 158 d，年平均无霜期为 237 d。土壤为粉砂岩母质上发育的棕壤土，土壤质地为中壤-重壤，微酸性，适宜雷竹生长。雷竹林覆盖方法按照当地农户的习惯做法实施^[18]，于当年 12 月 20 日进行。样地立竹度为 15 000 株·hm⁻²，雷竹林平均胸径为 3.89 cm，其中，竹杆数量为 1 年生:2 年生:3 年生=1.00:1.89:0.58。分别在土壤含水量最低(土壤凋萎含水量)和最高(土壤饱和含水量)时对土壤氧气体积分数进行测定，土壤氧气体积分数基本小于 14%，覆盖后有所下降，且随着土壤深度的增加和土壤含水量的上升而下降(表 1)。

1.2 试验处理

以人工经营雷竹林为对象，共设置 4 个处理，即覆盖不透气(M)、覆盖通气(MA)、不覆盖通气(A)和不覆盖不透气(ck)，每处理 3 次重复。埋管通气方法：在每个处理中选择立地条件较为一致的小区(10 m × 3 m)共 12 个，采用随机区组试验设计。用钻孔机在每个小区 60 cm 土层深处(雷竹根鞭主要分布于 20~30 cm 土层)平行于地面进行直线打孔，孔间距为 60 cm，然后穿引铺设塑料通气管道，并依次进行连接，其中管道外径 21 mm，壁厚 1 mm。并在管壁上每隔 30 cm 打 1 个直径为 0.2 mm 的小孔用作通气。每小区总管连接气泵，土壤中所通气体为空气，由压缩机(泉州劲霸，V-1.05/12.5，压力为 12 kg)输送。通气时间为 20 min，于每天 7:00-9:00 一次性通气，其中覆盖通气样地后期通气时间增加到

表 1 样地土壤氧气体积分数基本情况

Table 1 Soil oxygen content in sampling plots			
处理	深度/cm	土壤氧气体积分数/%	
		土壤凋萎含水量时	土壤饱和含水量时
覆盖前	10	15.18 ± 0.28	14.45 ± 0.17
	20	14.66 ± 0.19	13.12 ± 0.28
	30	14.45 ± 0.33	12.07 ± 0.42
	40	14.23 ± 0.11	10.16 ± 0.21
覆盖后	10	14.04 ± 0.07	13.45 ± 0.64
	20	13.85 ± 0.15	12.35 ± 0.47
	30	13.71 ± 0.16	12.25 ± 0.30
	40	13.81 ± 0.23	9.53 ± 0.33

说明：土壤氧气体积分数于 2017 年 12 月林地有机材料覆盖后测量；土壤凋萎含水量为 25%，土壤饱和含水量为 35%。数值为平均值±标准差

40 min, 于每天 7:30 和 16:30 进行通气, 每次 20 min。

试验于 2017 年 12 月林地有机材料覆盖开始后进行。雷竹林覆盖增产技术的核心是提高地温, 因此必须在不影响土壤温度的前提下提高氧浓度。在 30 cm 土层深处, 覆盖和 ck 在通气后, 各处理间土壤温度无显著差异, 表明埋管通气方法并不会影响土壤温度。

1.3 土壤氧气体积分数的测定

土壤氧气体积分数测定采用光纤式氧气测量仪(Firesting O₂, Pyro Science, 德国)。在垂直方向中, 于通气管道正上方埋入测氧探头, 埋入深度分别为 10 cm(V₁₀)、20 cm(V₂₀)、30 cm(V₃₀)和 40 cm(V₄₀); 在水平方向中, 于土层深 40 cm 处, 水平垂直于通气管道方向上, 以 V₄₀(H₀)为起点, 相隔距离分别为 15 cm(H₁₅)、30 cm(H₃₀)、45 cm(H₄₅)和 60 cm(H₆₀)依次埋入探头。隔 0.5 h 测定 1 次实时土壤氧气体积分数, 监测 24 h, 各样地选 3 处进行重复。

1.4 数据处理

利用 Excel 进行数据处理并绘图, 用 SPSS 11.5 进行统计分析, 处理间差异用 LSD 或 Duncan 比较。

2 结果与分析

2.1 埋管通气对氧气在土壤中扩散分布的影响

2.1.1 埋管通气对土壤水平方向上氧气扩散的影响 在土壤含水率 25%左右, 连续每天通气, 40 cm 土层土壤各点氧气体积分数改善显著(图 1)。H₀ 位于通气管道正上方, 与通气管道垂直相距 20 cm, 不覆盖通气处理下(A), 日均氧气体积分数可达(19.31±0.03)%, 覆盖通气处理下(MA)日均氧气体积分数为(17.62±0.28)%。在 A 处理下, 7:30 开始通气后, 土壤氧气体积分数有 1 个明显的急剧上升过程, 0.5 h 后达到峰值, 氧气体积分数为(19.98±0.15)%, 之后逐渐下降趋于平缓, 呈单峰曲线变化。H₁₅ 和 H₃₀ 氧气体积分数分别在 22:30 和 6:30 时达最大值, 分别为(18.19±0.20)%和(17.10±0.12)%, 且氧气体积分数的波动幅度较为平缓。其中, H₃₀ 距离通气管道距离最远, 2:00 左右开始缓慢上升, 至第 2 天 6:30 达最大值, 之后缓慢下降, 说明通气效果具有滞后性。同样深度下, ck 处理的氧气体积分数仅维持在 14.00%左右, 且保持稳定。MA 处理下, 由于分 2 次通气, 土壤氧气体积分数呈双峰曲线变化, H₀

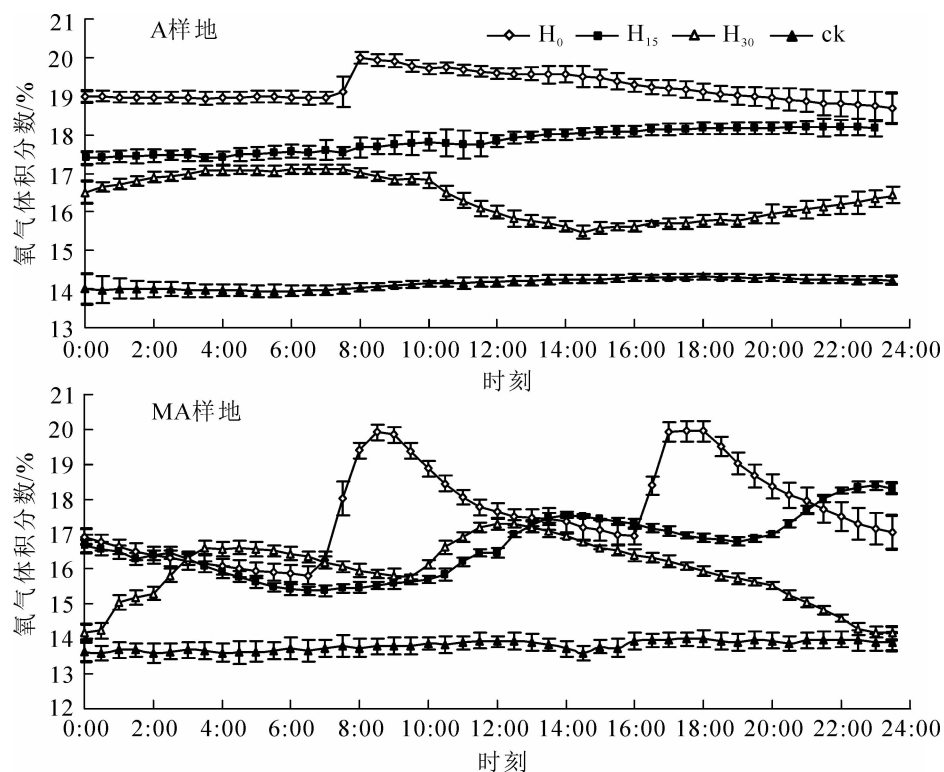


图 1 水平方向上不覆盖通气样地(A)和覆盖通气样地(MA)在 40 cm 土层氧气体积分数动态变化

Figure 1 Daily variation of soil oxygen content in horizontal level at the depth of 40 cm of different treatments between no mulching with aeration(A) and mulching with aeration(MA)

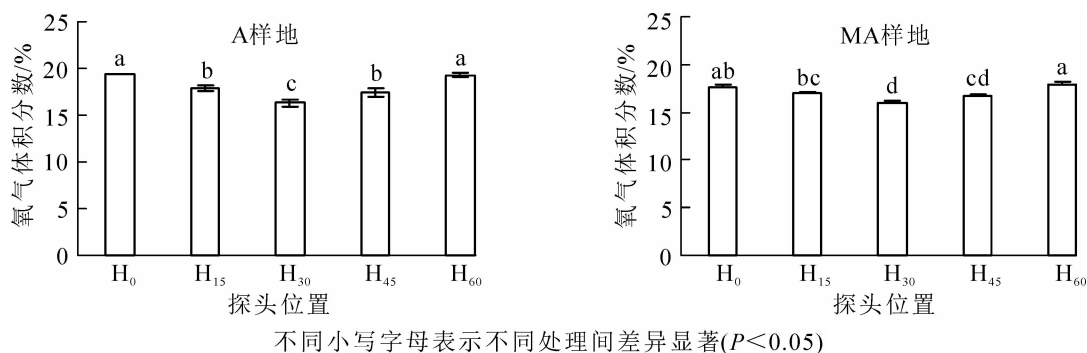


图2 通气管道距离对土壤氧气体积分数的影响

Figure 2 Soil oxygen content away from different sensors position

在 8:30 和 17:00 达峰值, 分别为 $(19.91 \pm 0.23)\%$ 和 $(19.92 \pm 0.27)\%$ 。 H_{15} 和 H_{30} 变化幅度较缓, 在 23:00 和 12:30 出现峰值, 分别为 $(18.39 \pm 0.12)\%$ 和 $(17.30 \pm 0.10)\%$, 与 A 处理的变化规律相似, 同样深度下, 覆盖不通气处理(M)下氧气体积分数仅为 $(13.81 \pm 0.24)\%$ 。 H_{45} 、 H_{60} 与 H_{15} 和 H_{30} 位置相对一致, 变化趋势相似, 故在图 1 中省略。由于管道间距为 60 cm, 因此两管道中间的氧气体积分数最低, 总体呈波浪式的规律, 距离通气管道越近, 氧气体积分数越高(图 2)。在 A 处理下, H_{15} 、 H_{30} 、 H_{45} 与 H_0 分别达到显著差异($P < 0.05$), 但与 H_{60} 差异不显著($P > 0.05$); 在 MA 处理下, H_{30} 、 H_{45} 与 H_0 达到显著差异($P < 0.05$)。说明埋管通气能明显提高土壤中水平方向的氧气体积分数, 但气体在横向扩散时由于受到的阻力和扩散过程中氧气的消耗和逃逸, 延迟了土壤氧气体积分数峰值出现的时间和平均氧气体积分数。

2.1.2 埋管通气对土壤垂直方向上氧气扩散的影响 在整个检测期间, 通气处理样地的土壤氧气体积分数显著高于不通气处理样地, 且随着土壤深度的增加氧气体积分数呈上升趋势。各土层的氧气体积分数变化趋势一致, 均在通气后呈明显急剧上升趋势, 到达峰值后逐渐缓慢下降最后趋于平稳(图 3)。在不覆盖通气处理(A)中, 各土层从浅到深氧气体积分数比对照(ck)分别提高了 0.78%、2.68%、4.07%和 4.98%。其中, V_{20} 和 V_{30} 氧气体积分数较为相似, 与 V_{10} 相差较大, 可能与竹鞭的生长分布有关(20~30

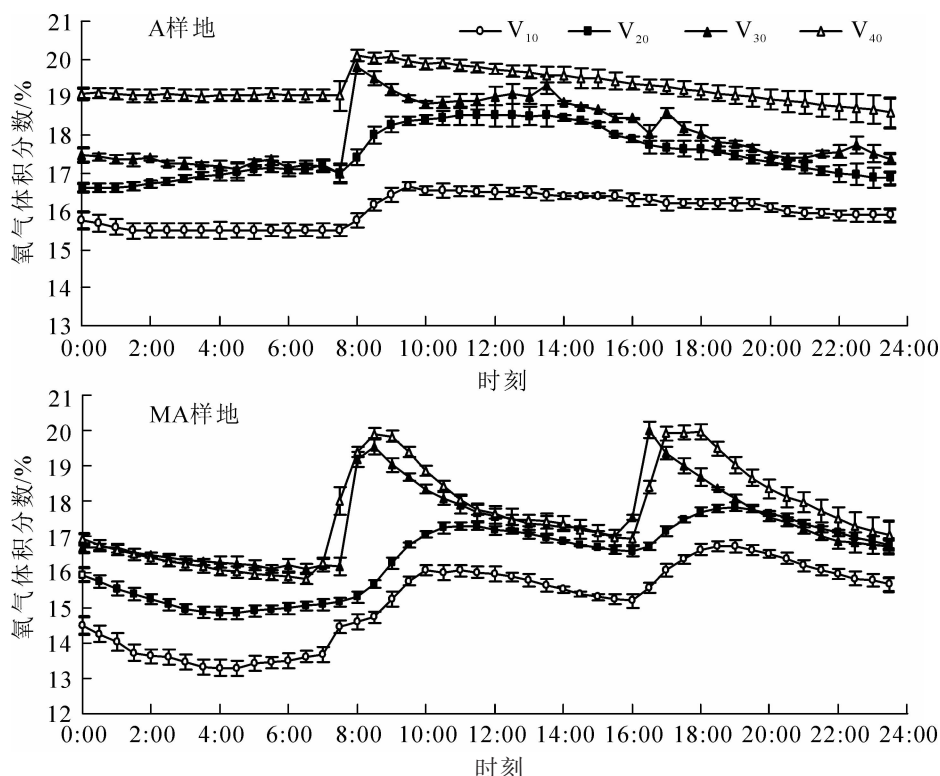


图3 垂直方向上不覆盖通气样地(A)和覆盖通气样地(MA)各土层氧气体积分数的变化

Figure 3 Daily variation of soil oxygen content in vertical level after aeration of different treatments between no mulching with aeration (A) and mulching with aeration(MA)

cm)。在覆盖通气处理(MA)中,各土层氧气体积分数均存在 2 个明显上升阶段,即 7:30 和 16:30 通气开始后,之后逐渐下降趋于平稳,相较于 A 处理,各土层从浅到深氧气体积分数分别提高了 1.09%、2.54%、3.65%和 3.80%。在 ck 处理和 M 处理中,不通气和覆盖处理的土壤氧气体积分数均随着深度的增加而下降,且各处理下多数土层间氧气体积分数相似,但 ck 处理的各土层氧气体积分数均高于 M 处理。本研究中,通气明显提高了土壤垂直方向上的氧气体积分数,且随着土壤深度的增加,提升的幅度越大,说明距离通气管道越近氧气体积分数越高,但气体在向上扩散过程中损失和消耗了部分氧气,使得氧气体积分数呈下降趋势。表 2 表明:通气处理与不通气处理各土层间氧气体积分数差异显著($P<0.05$)。

表 2 不同处理下各土层的氧气体积分数

Table 2 Soil oxygen content in vertical layer under different treatments

处理	不同土层氧气体积分数/%			
	10	20	30	40 cm
ck	15.18 ± 0.28 b	14.66 ± 0.19 c	14.45 ± 0.33 c	14.23 ± 0.11 c
A	16.24 ± 0.18 a	17.15 ± 0.19 a	18.19 ± 0.12 a	19.31 ± 0.03 a
M	14.04 ± 0.07 c	13.85 ± 0.15 d	13.71 ± 0.16 d	13.81 ± 0.23 d
MA	15.13 ± 0.47 b	16.40 ± 0.38 b	17.37 ± 0.46 b	17.62 ± 0.28 b

说明:数值为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)

2.1.3 埋管通气对土壤横剖面氧气体积分数的影响 从表 3 可见:通气后,各土层氧气体积分数均能保持在 14%以上。随着土层的变浅和通气管道的距离增加,土壤氧气体积分数呈下降趋势。显著性检验表明:剖面上大部分点之间的氧气体积分数达到差异显著水平($P<0.05$)。土壤通气后,随着与通气源点距离的增加,空气浓度逐渐稀释,通气增氧效果逐渐减弱。在不覆盖通气处理(A)中,土层 40 cm 深,距离管道 30 cm 处的氧气体积分数反而显著低于上层,可能由于土壤气体的横向扩散能力弱于纵向扩散能力和烟囱效应,气体优先流向土壤表面。覆盖通气处理(MA)中,土壤剖面各点的氧气体积分数比 A 处理小,变化幅度较缓。

表 3 通气对土壤剖面氧气体积分数的影响

Table 3 Effect of aeration on soil oxygen content in the cross section of soil

处理	深度/cm	通气管道水平不同距离的氧气体积分数/%		
		0	15	30 cm
A	10	16.24 ± 0.18 f	16.16 ± 0.33 f	15.75 ± 0.20 g
	20	17.56 ± 0.22 d	16.31 ± 0.19 f	14.59 ± 0.21 h
	30	18.55 ± 0.10 b	17.62 ± 0.15 c	17.20 ± 0.16 d
	40	19.26 ± 0.11 a	18.19 ± 0.18 b	16.75 ± 0.20 e
MA	10	15.13 ± 0.36 hi	15.64 ± 0.28 fgh	14.92 ± 0.28 i
	20	16.40 ± 0.12 cde	16.23 ± 0.26 def	15.26 ± 0.28 ghi
	30	17.37 ± 0.62 ab	16.48 ± 0.31 cd	15.84 ± 0.27 efg
	40	17.62 ± 0.48 a	16.94 ± 0.23 bc	15.71 ± 0.23 fgh

说明:数值为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)

2.2 埋管通气对土壤饱和含水量时氧气体积分数的影响

当土壤含水量上升达到饱和时(35%左右),各处理土壤氧气体积分数明显下降(图 4)。覆盖处理(M)下,各土层氧气体积分数从浅到深分别下降 0.63%、1.47%、1.31%和 4.05%($P<0.05$),对照(ck)各土层下降 1.02%、1.36%、2.04%和 4.18%($P<0.05$);覆盖通气(MA)和不覆盖通气(A)各土层分别下降 0.45%、1.70%、3.17%和 3.80%($P<0.05$)和 1.10%、0.53%、1.33%、1.56%($P<0.05$)。表明当土壤含水量升高时,氧气体积分数会随之降低,且土层越深,下降越多。埋管通气在一定程度上能减缓氧气体积分数的下降,并始终保持一个较为稳定的氧气体积分数。

3 讨论

一般情况下,土壤氧气体积分数达15%才能满足植物呼吸作用的需要^[19]。但由于连年覆盖,降雨渍水,土壤板结、高温等影响,集约经营雷竹林土壤长期存在缺氧现象^[20-22]。通气能缓解缺氧胁迫,提高根系活力^[23]。在实际生产中,加氧灌溉管道水气均一性较差,导致田间作物产量不均匀^[24];长期化学增氧是否会影响植物生长还需进一步研究验证;机械加气需要耗费人力电力,增加生产投入。

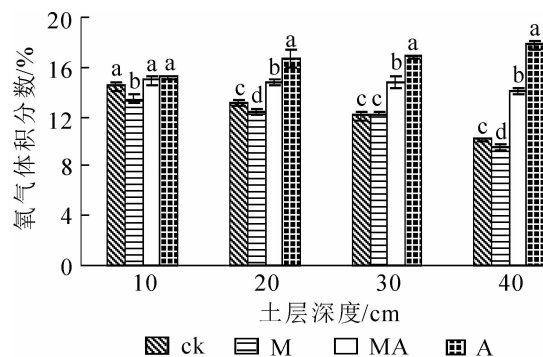
本研究表明:土壤埋管通气能显著提升垂直方向上各土层氧气体积分数,且随着深度的增加提升效果越明显,最高可达4.98%。在自然状态下,土壤中的氧主要靠大气向土壤的扩散为主^[25],表层土壤疏松多孔,利于空气交换^[26]。覆盖后,空气扩散受到阻碍,而且覆盖物的增温发酵也会消耗更多的氧气。因此,ck处理各土层氧气体积分数高于M处理,且均随深度的增加而下降。此外,土壤含水量对氧气体积分数也有较大影响^[14],含水量上升时土壤氧气体积分数下降(表1)。埋管通气后,土壤氧的主要来源发生改变,随着空气在土壤扩散以及根系和微生物的消耗,土壤氧气体积分数由埋管处向表层递减。在土层水平方向上,通气显著提升了土壤氧气体积分数,随着通气管道距离的增加提升量逐渐下降。由于气体在土壤中优先选择向上扩散路径和烟囱效应^[2],因此,在水平方向上土壤氧气体积分数的提升较为平缓 and 滞后。相同土层间的根系分布,土壤理化性质更为一致,这也是水平方向上土壤氧气体积分数差异更小的原因。另外,土壤含水量的上升对氧气体积分数也有较大影响,在地下灌溉后土壤氧气体积分数明显下降,甚至接近于零,灌溉后土壤的短暂通气能迅速提高氧气体积分数^[27]。在土壤湿度较高的情况下,土壤水分对土壤呼吸的影响主要受氧气的控制^[28],因此提升土壤氧气体积分数显得尤为重要。

4 结论

地下埋管通气并不会降低冬季覆盖土壤温度,可以有效改善雷竹林土壤通气状况,防止因渍水、覆盖、板结等而导致的土壤氧气体积分数下降等负面影响,可有效缓解雷竹林缺氧胁迫。在不覆盖处理下,每天通气20 min可有效提升土壤氧气体积分数。在覆盖处理下,土壤各层氧气体积分数均会有所下降,可增加通气时间和通气频率来向土壤补充更多氧气。雷竹林埋管通气是提升土壤氧气体积分数的有效技术措施,在实际运用中前景广阔。

5 参考文献

- [1] 雷宏军,胡世国,潘红卫,等.土壤通气性与加氧灌溉研究进展[J].土壤学报,2017,54(2):297-308.
LEI Hongjun, HU Shiguo, PAN Hongwei, et al. Advancement in research on soil aeration and oxygation [J]. *Acta Pedol Sin*, 2017, 54(2): 297-308.
- [2] BEN-NOAH I, FRIEDMAN S P. Aeration of clayey soils by injecting air through subsurface drippers: lysimetric and field experiments [J]. *Agric Water Manage*, 2016, 176: 222-233.
- [3] ARMSTRONG W D. Aeration in higher plants [J]. *Adv Bot Res*, 1979, 7: 225-332.
- [4] BHATTARAI S P, PENDERGAST L, MIDMOERE D J. Root aeration improves yield and water use efficiency of tomato in heavy clay and saline soils [J]. *Sci Hortic*, 2006, 108(3): 278-288.
- [5] 方伟,何钧潮,卢学可,等.雷竹早产高效栽培技术[J].浙江林学院学报,1994,11(2):121-128.
FANG Wei, HE Junchao, LU Xueke, et al. Cultivation techniques of early shooting and high yielding for lei bamboo sprout [J]. *J Zhejiang For Coll*, 1994, 11(2): 121-128.
- [6] 俞樟福,何绍峰,孙建国,等.早园竹覆盖的负面作用及其对策[J].浙江林业科技,2001,21(2):42-45.
YU Zhangfu, HE Shaofeng, SUN Jianguo, et al. Studies on negative effect of coverage in *Phyllostachys propinqua* stand



数值为平均值±标准差;同深度不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)

图4 土壤饱和含水量时土壤氧气体积分数

Figure 4 Soil oxygen content under soil saturated water content

- and countermeasures [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2001, **21**(2): 42 – 45.
- [7] 胡超宗, 金爱武, 郑建新, 等. 雷竹地下鞭的系统结构[J]. 浙江林学院学报, 1994, **11**(3): 264 – 268.
HU Chaozong, JIN Aiwu, ZHENG Jianxin, *et al.* Composition of lei bamboo rhizomatic system [J]. *J Zhejiang For Coll*, 1994, **11**(3): 264 – 268.
- [8] 吕昕, 江雄波, 向臻峰, 等. 雷竹林鞭根系统的研究与分析[J]. 湖北林业科技, 2014, **43**(4): 38 – 40.
LÜ Xin, JIANG Xiongbo, XIANG Zhenfeng, *et al.* Research and analysis on rhizome-root system of *Phyllostachys praecox* cv. *prevernalis* forest [J]. *Hubei For Sci*, 2014, **43**(4): 38 – 40.
- [9] BHATTARAI S P, NINGHU S U, MIDMOERE D J. Oxygation unlocks yield potentials of crops in oxygen-limited soil environments [J]. *Adv Agronomy*, 2005, **88**: 313 – 377.
- [10] GRABLE A R. Soil aeration and plant growth [J]. *Adv Agronomy*, 1966, **18**: 57 – 106.
- [11] ABU-HAMDEH N H. Effect of compaction and deep tillage on soil hydraulic and aeration properties and wheat yield [J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2003, **34**(15/16): 2277 – 2290.
- [12] AYARS J E, PHENE C J, HUTMACHER R B, *et al.* Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the water management research laboratory [J]. *Agric Water Manage*, 1999, **42**(1): 1 – 27.
- [13] BUSSCHER W J. Improved growing conditions through soil aeration [J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1982, **13**(5): 401 – 409.
- [14] BHATTARAI S P, HUBER S, MIDMORE D J, *et al.* Aerated subsurface irrigation water gives growth and yield benefits to Zucchini, vegetable soybean and cotton in heavy clay soils [J]. *Ann Appl Biol*, 2004, **144**(3): 285 – 298.
- [15] URRESTARAZU M, MAZUELA P C. Effect of slow-release oxygen supply by fertigation on horticultural crops under soilless culture [J]. *Sci Hortic*, 2005, **106**(4): 484 – 490.
- [16] BONACHELA S, QUESADA J, ACUNA R A, *et al.* Oxyfertigation of a greenhouse tomato crop grown on rockwool slabs and irrigated with treated wastewater: oxygen content dynamics and crop response [J]. *Agric Water Manage*, 2010, **97**(3): 433 – 438.
- [17] MAESTRE-VALERO J F, MARTINEZ-ALVAREZ V. Effects of drip irrigation systems on the recovery of dissolved oxygen from hypoxic water [J]. *Agric Water Manage*, 2010, **97**(11): 1806 – 1812.
- [18] 汪祖潭, 方伟, 何钧潮. 雷竹笋用林高产高效栽培技术[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995.
- [19] 朱鹤建, 何宜更. 土壤地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992: 8 – 50.
- [20] CHEN Hongbo, LI Tianlai, SUN Zhouping, *et al.* Effects of rhizosphere aeration on enzyme activities and nutrient content of matrix for cucumber in protected cultivation [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2009, **15**(6): 1470 – 1474.
- [21] POYSA V W, TAN C S, STONE J A. Flooding stress and the root development of several tomato genotypes [J]. *Hortscience*, 1987, **22**(1): 24 – 26.
- [22] ITYEL E, BEN-GAL A, SILBERBUSH M, *et al.* Increased root zone oxygen by a capillary barrier is beneficial to bell pepper irrigated with brackish water in an arid region [J]. *Agric Water Manage*, 2014, **131**: 108 – 114.
- [23] 吕培. 通气对覆盖栽培雷竹生长的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2016.
LÜ Pei. *Effect of Aeration Treatment on the Growth of Mulching Cultivation Phyllostachys praecox* [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2016.
- [24] TORABI M, MIDMORE D J, WALSH K B, *et al.* Analysis of factors affecting the availability of air bubbles to subsurface drip irrigation emitters during oxygation [J]. *Irrig Sci*, 2013, **31**(4): 621 – 630.
- [25] WELTECKE K, GAERTING T. Influence of soil aeration on rooting and growth of the Beuys-trees in Kassel, Germany [J]. *Urban For Urban Greening*, 2012, **11**(3): 329 – 338.
- [26] 王超, 杨智杰, 陈光水, 等. 土壤垂直剖面的 CO₂ 通量研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 2010, **5**(4): 85 – 92.
WANG Chao, YANG Zhijie, CHEN Guangshui, *et al.* Research on the flux of carbon dioxide in soil vertical profile [J]. *J Subtrop Resour Environ*, 2010, **5**(4): 85 – 92.
- [27] NIU Wenquan, GUO Qing, ZHOU Xiaobo, *et al.* Effect of aeration and soil water redistribution on the air permeability under subsurface drip irrigation [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2012, **76**(3): 815 – 820.
- [28] 骆亦其, 周徐辉. 土壤呼吸与环境[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.