

冯秀智,童志鹏,胡竹平,等. 不同配植孝顺竹土壤-植物氮磷生态化学计量特征[J]. 江苏农业科学,2018,46(21):315-318.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.21.077

不同配植孝顺竹土壤-植物氮磷生态化学计量特征

冯秀智^{1,2}, 童志鹏³, 胡竹平³, 黄程鹏^{1,2}, 周秀峰^{1,2}, 葛高波⁴, 吴家森^{1,2}

(1. 浙江农林大学/浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室,浙江临安 311300; 2. 浙江农林大学/亚热带森林培育国家重点实验室,浙江临安 311300; 3. 浙江省临安市林业局,浙江临安 311300; 4. 惠多利农资有限公司,浙江杭州 311000)

摘要:为探究不同经营措施对孝顺竹(*Bambusa multiplex*)生长的影响,以及竹类植物叶片以外器官的氮磷化学计量特征是否适用于表征植株生长状况及土壤养分丰缺,对浙江农林大学竹种园内列植、群植 2 种配植的孝顺竹林地土壤-植物氮磷含量及其化学计量特征进行研究。结果表明,群植孝顺竹林地土壤有机碳、碱解氮、有效磷含量高于列植,有效氮磷比值(42.18 ± 6.36)远低于列植(118.70 ± 24.51),列植具有降低土壤有效养分的作用,群植模式更有利于养分循环平衡。列植模式可以促进孝顺竹氮素在笋、秆中的积累而降低全株磷的积累,列植氮磷比介于 8.02 ~ 19.72,群植介于 3.30 ~ 18.18,传统以叶片氮磷生态化学计量特征来表征孝顺竹植株生长状态及土壤养分丰缺情况的方式并不合适,尤其是在人为干预条件下。

关键词:孝顺竹;土壤;氮磷比;生态化学计量学;列植;群植

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)21-0315-04

生态化学计量学是研究生态过程中化学元素比例关系及其随环境因子变化规律的科学,揭示了有机体主要元素间的联系,从分子到生态系统,元素均按一定比例组成^[1],而生态化学计量学通过研究生态过程中多重化学元素平衡关系,从元素比例的角度把不同层次的研究结果统一起来^[2],为生态系统过程中土壤-植物的养分组成及供求平衡提供了一个新的研究思路 and 手段^[1],对认识生态系统养分循环具有重要的科学意义^[3]。

氮和磷对生物的生长、发育以及行为都起着非常重要的作用,也是陆地生态系统中植物生长最主要的限制因素之一^[4-5]。氮磷比值可以反映植物组成、功能和氮磷养分限制格局^[6-8]。Han 等以我国 754 种陆地植物叶片为研究对象,结果发现,与全球水平相比有着较低磷含量(1.21 g/kg)和较高的氮磷比(14.4)的特征,这一现象主要是由低纬度土壤含磷量低引起的,尤其在我国的南方地区^[9-11]。Yan 等对富磷土壤 126 种植物的研究表明,外源氮对氮磷比的影响并不显著,植物叶片氮磷比主要受土壤磷丰缺的限制,表现为随土壤磷含量的增大而显著降低^[12]。甘露等对 89 种植物叶片氮浓度进行分析,大小表现为乔木 > 灌木 > 阔叶 > 针叶、被子 and 双子叶 > 裸子和单子叶^[13]。由此可见,不同植物对氮磷的吸收利用存在差异,对不同养分供应采取不同的适应对策。但是,目前化学计量学研究多单独集中在叶片,对植物其他器官的研究较少。

竹林作为森林生态系统的重要组成部分,近年来学者对

其关注度越来越高。研究表明,生产力水平对毛竹 [*Phyllostachys heterocycla* (Carr.) Mitford cv. *Pubescens*] 林植被碳、磷元素在不同器官间分配比例的影响较小,对氮素分配比例的影响较大^[14];采伐导致大量养分输出,若采伐时将竹叶带出竹林,则氮、磷、钾等 6 种元素的养分输出总量将增加 1.48 倍^[15];雷竹(*Phyllostachys praecox* f. *prevelnalis*) 林土壤随着覆盖年限增加,各土层氮磷含量均提高^[16];短期覆盖(≤ 3 年)经营雷竹林叶片氮磷比降低,长期覆盖(6 年)经营氮磷比升高^[17]。这些研究表明,不同的经营方式均改变了土壤的养分情况和植物氮、磷含量及比值。孝顺竹是丛生竹中比较有代表性的竹种之一,具有较高的观赏价值与适应能力、良好的固碳潜力以及较强的抗寒能力,极具推广引种价值^[18-19]。孝顺竹多被用于园林绿化、景观布置,常以列植、群植方式出现。不同配植方式由于经营措施不同,必定对孝顺竹林地土壤养分及植株生长产生影响。因此开展不同配植模式下,孝顺竹林地土壤-地上部各器官氮磷营养元素含量及化学计量特征研究,可以明晰 2 种经营模式对孝顺竹养分的影响,以及不同器官化学计量特征之间的关系,为孝顺竹的林地土壤管理、园林设计等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于浙江省临安市,素有“中国竹子之乡”的称号,属亚热带季风气候,年平均温度为 16°C ,年平均降水量为 $1\,613.9 \text{ mm}$,年降水日达到 158 d,年平均无霜期为 237 d。采样地位于浙江农林大学试验林场(地理位置为 $119^\circ43'43''\text{E}$, $30^\circ15'22''\text{N}$),坡度 5° ,坡向西南。

试验林场于 2001 年建立,建立时对土地进行整理,去除表土层,保留底土层,而后进行均匀平整土地,从而保持土壤条件基本一致。初植株行距为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$,每丛孝顺竹 10 株。根据园林绿化中孝顺竹常用配植模式列植、群植的特征,随机

收稿日期:2017-05-10

基金项目:浙江省自然科学基金(编号:LY13C160010);浙江农林大学科研发展基金(编号:2014FR052)。

作者简介:冯秀智(1992—),女,浙江临海人,硕士,主要研究方向为竹林生态与环境。E-mail: xzfeng@yeah.net。

通信作者:吴家森,博士,教授级高级工程师,主要研究方向为森林土壤与环境。E-mail: jswu@zafu.edu.cn。

将孝顺竹的配植方式分为无人管理的群植与不定期清理林下枯枝落叶、修枝钩梢、5—6 月伐去老死竹及部分过密植株的列植 2 种模式。

1.2 样品采集

2014 年 8 月,在全面踏查的基础上,在生长状况和立地条件等具有代表性的 2 种配植(群植、列植)孝顺竹林,分别建立标准地各 4 个,面积均为 10 m×10 m。对每块标准地内的竹子按不同年龄进行每株检尺,计算出不同年龄竹子的平均胸径,选取与平均胸径一致的竹子作为标准株,砍伐不同年龄标准株(笋、1 年植株、2 年植株)各 3 株。野外分离叶、枝、秆,并且各部位样品均按上、中、下 3 个部位取样,组成均匀混合样品后取约 1 000 g,置于样品袋中带回实验室^[20]。

在各个标准地中以多点采样的方式,各点均取 0~20 cm 的表层土壤样品 500 g,混合多个样品作为该标准地样品,置于样品袋中,带回实验室。

1.3 样品测定

1.3.1 植物样品处理及测定 植株样品在实验室内用去离子水清洗后于 105 ℃ 杀青 30 min,接着在 80 ℃ 条件下继续烘干至恒质量,用高速粉碎机将样品粉碎后测定氮磷含量。将处理好的样品分为 2 份,一份用 Elementar Vario MAX CN 碳氮元素分析仪(德国 Elementar 公司)测定氮含量;另一份称取 0.200 0~0.300 0 g 样品,用 H₂SO₄-H₂O₂ 凯氏消煮法消解,钼蓝比色-分光光度法测定磷含量^[21]。

1.3.2 土壤样品处理及测定 采集的土壤经过风干、磨细处理后,进行土壤理化性质分析。有机碳含量采用重铬酸钾-外加加热法测定;碱解氮含量用碱解扩散法测定;有效磷含量用 HCl-NH₄F 浸提-钼锑钒比色法测定^[22]。

1.4 数据处理

数据均用 Excel 2003 进行整理,DPS v7.05 进行分析,采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)的最小显著差异(LSD)进行差异显著性检验及相关性分析,并用 Origin 8.5 作图。

2 结果与分析

2.1 不同配植孝顺竹土壤性质

由表 1 可知,列植孝顺竹土壤有效氮磷比值显著高于群植孝顺竹土壤;列植孝顺竹土壤有效磷含量较低,平均值仅 0.60 mg/kg,显著低于群植孝顺竹土壤;有机碳、碱解氮含量在不同配植孝顺竹土壤之间无显著性差异。

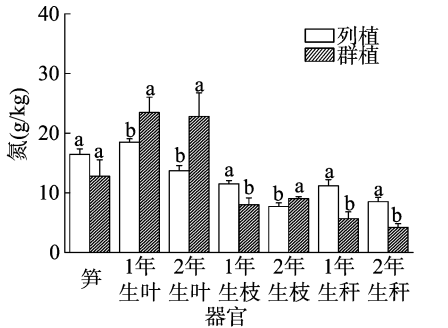


图1 不同配植不同年龄孝顺竹地上部分氮含量

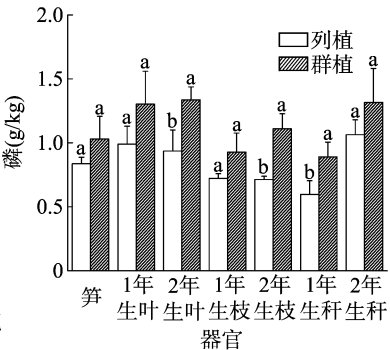


图2 不同配植不同年龄孝顺竹地上部分磷含量

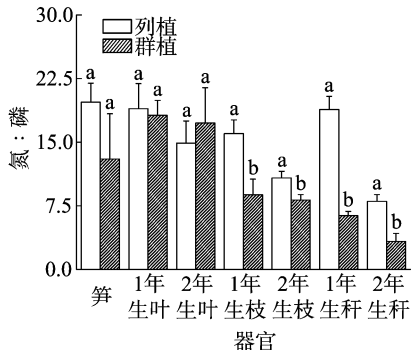


图3 不同配植不同年龄孝顺竹地上部分氮磷化学计量比

表 1 不同配植孝顺竹土壤性质比较

配植方式	土壤性质			
	有机碳含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	有效氮磷比值
列植	13.02 ± 1.81a	70.29 ± 5.95a	0.60 ± 0.08b	118.70 ± 24.51a
群植	13.54 ± 0.39a	80.44 ± 10.87a	1.91 ± 0.09a	42.18 ± 6.36b

注:同列数据后不同小写字母表示不同配植间在 0.05 水平上差异显著。

2.2 不同配植孝顺竹不同年龄地上部分氮磷含量

由图 1 可知,除群植枝条外,孝顺竹地上部各器官氮含量均随年龄的增加而下降。竹叶氮含量均为群植>列植,1 年生枝氮含量为列植>群植,2 年生枝则为群植>列植,竹笋及竹秆氮含量均为列植>群植,并且除笋外,群植与列植之间的差异达显著水平。

由图 2 可知,列植叶、枝磷含量表现为随年龄的增加而下降,群植则相反,竹秆磷含量均表现为 2 年生>1 年生。孝顺竹地上部分各器官在年龄一致的情况下均表现为群植>列植,其中 2 年生竹叶、枝和 1 年生竹秆列植、群植之间的差异达显著水平。

2.3 不同配植不同年龄孝顺竹地上部分氮磷化学计量比

由图 3 可知,列植各器官氮磷比变动范围为 8.02~19.72,最大值为竹笋,最小值为 2 年生竹秆;群植变动范围为 3.30~18.18,最大值为 1 年生竹叶,最小值也是 2 年生竹秆。孝顺竹地上部分各器官氮磷比值均随年龄的增加而下降,列植变化幅度较群植大。除 2 年生竹叶氮磷比值为群植>列植外,其余均表现为列植>群植,枝、秆在不同配植之间达到显著性差异水平。

2.4 2 种配植孝顺竹土壤-植物养分及氮磷比相关性分析

对 2 种配植孝顺竹各器官(笋、叶、枝、秆,其中叶、枝、秆均包括 1 年生、2 年生数据)氮磷比值分别与各器官氮磷含量、土壤有效养分含量进行相关性分析。由表 2 可知,列植模式中有 10 对因子的相关性达显著或极显著水平,具体表现为笋氮磷比与枝氮含量达到显著负相关水平,枝氮磷比则与笋磷含量、叶氮含量呈显著正相关关系;叶氮磷比与土壤碱解氮含量呈显著正相关关系,秆氮磷比与土壤有效磷含量呈显著正相关关系,与土壤有效氮磷比达到显著负相关水平。群植模式中仅有 6 对因子之间具有显著或极显著相关关系,其中叶氮磷比值与土壤碱解氮含量呈极显著正相关关系,与土壤有

表 2 孝顺竹各器官氮磷比与各器官及土壤养分含量的相关性分析

指标	相关系数							
	列植				群植			
	笋氮磷比	叶氮磷比	枝氮磷比	秆氮磷比	笋氮磷比	叶氮磷比	枝氮磷比	秆氮磷比
笋氮含量	0.99 **	0.65	-0.94	0.05	0.98 *	-0.38	0.20	-0.35
笋磷含量	-1.00 **	-0.54	0.98 *	-0.19	-0.96 *	-0.11	0.29	0.75
叶氮含量	-0.27	0.69	0.95 *	0.93	0.45	0.58	0.56	-0.12
叶磷含量	-0.76	-0.55	0.29	0.31	0.28	-0.70	0.71	0.14
枝氮含量	-0.98 *	0.68	0.98 *	0.93	0.86	-0.45	0.13	-0.51
枝磷含量	0.95	0.40	-0.19	0.15	0.68	-0.20	-0.73	-0.64
秆氮含量	0.24	0.71	0.83	0.81	-0.76	-0.23	0.47	0.82
秆磷含量	0.08	-0.46	-0.81	-0.97 *	-0.88	0.20	-0.16	-0.85
土壤碱解氮含量	0.33	0.96 *	-0.09	-0.88	-0.25	1.00 **	-0.96 *	-0.68
土壤有效磷含量	0.36	-0.57	-0.57	0.98 *	-0.87	-0.35	0.52	0.89
土壤有效氮磷比	0.00	0.82	0.24	-0.99 *	0.05	0.98 *	-1.00 **	-0.86

注: *、** 分别表示在 0.05、0.01 水平上显著相关。

效氮磷比呈显著正相关关系,枝氮磷比则与土壤碱解氮含量呈显著负相关关系,与土壤有效氮磷比则呈极显著负相关关系。

3 讨论

3.1 不同配植孝顺竹土壤性质差异

有研究表明,我国毛竹主产区不同生产力水平的竹林土壤碱解氮含量最低为 119.16 mg/kg,有效磷含量仅为 0.46 ~ 1.00 mg/kg,有效氮磷比高达 199.37 ~ 392.22^[22];叶晶等研究显示,种植青皮竹(*Bambusa textilis*)的土壤碱解氮含量为 159.18 mg/kg,有效磷含量为 6.23 mg/kg,有效氮磷比为 25.55^[23];而本研究中孝顺竹土壤碱解氮、有效磷含量均较低,尤其列植有效磷含量仅 0.60 mg/kg,显著低于群植,有效氮磷比介于散生竹(毛竹)与丛生竹(青皮竹)之间,且列植(118.70)显著高于群植(42.18)。与浙江省森林土壤养分分级标准^[24]相比,2 种配植孝顺竹土壤有机质含量达到三级水平,而群植土壤碱解氮含量为二级水平、列植土壤碱解氮含量以及 2 种配植的土壤有效磷含量均处一级水平,较为缺乏。

李艳研究发现,刈割将使土壤速效氮含量降低,而促进有效磷含量上升,速效氮磷比减小^[25]。本研究表明,列植导致土壤有效磷含量显著降低,有效氮磷比显著增大,这可能是由于列植模式清理了大量的枯枝落叶,使得养分回归量大大减少,土壤养分含量呈下降趋势。因此,列植模式应每年将清理的枯枝落叶置于竹丛蔸部,尽量减少养分流失,维持养分循环平衡。

3.2 不同配植对孝顺竹各器官养分含量的影响

养分元素是森林生态系统保持稳定与发展的基础,其含量与分配体现了植物对养分的吸收及需求,反映了植物对不同环境的适应能力^[26]。刈割、修枝、钩梢等措施都可对植物的生长组织产生破坏,在一定程度上刺激侧枝或者新生组织的再生^[27-29],从而导致氮磷在植物不同器官中的重新分配。本研究表明,不同配植孝顺竹各器官养分含量差异较大,列植条件下,叶中氮、所有器官中磷含量均表现为列植低于群植,主要与列植模式中的钩梢、清理过密植株有关。这与刘西军等研究结果相似,即杨树修枝降低了枝、干中氮磷的含量^[30],另外,本研究中列植模式土壤有效磷含量仅为群植土壤的 30% 左右,也是导致列植孝顺竹各器官磷含量低于群植的主要原因,表明在一定程度上列植导致的养分流失效应大于孝

顺竹的补偿性生长效应。

3.3 不同配植对孝顺竹各器官氮磷化学计量比的影响

植物叶片氮、磷含量及氮磷含量比值往往被当作土壤养分丰缺的重要指标^[31-32],这大多基于叶片生长相对旺盛、代谢活动强、易获取养分等因素,并将叶片作为整个植株养分情况的代表。但是竹子的特殊性在于竹秆、枝、鞭有许多节与节间,生长时每个节间都有居间分生组织,能同时进行细胞分裂和生长,比如毛竹可在 2 ~ 3 个月内完成 10 ~ 15 m 高的茎秆生长,生长的高峰期可以达到 1.0 ~ 2.0 m/d,3 年生竹子已出现老化趋势,大约每 5 年竹子进行 1 次更新^[33-34],其生长速度远大于一般树种。而与草本植物相比,竹类植物如麻竹,叶片生物量比例(12.36%)较低,秆却高达 65.05%;在氮磷积累量上,叶片氮积累量约占 25.35%,磷积累量约占 23.08%,均低于枝、秆的积累量^[26,35]。叶片氮磷积累量相对较低,主要积累部位为秆,且磷较氮更易于积累于秆,列植较群植秆积累偏向更明显(图 4)。因此,在孝顺竹地上部分各器官中,相比叶片,秆更能表征植株的营养状况和土壤养分情况,尤其在人为干扰较大的列植模式下,秆更具有稳定性,对于整个植株养分的表征性优于叶。

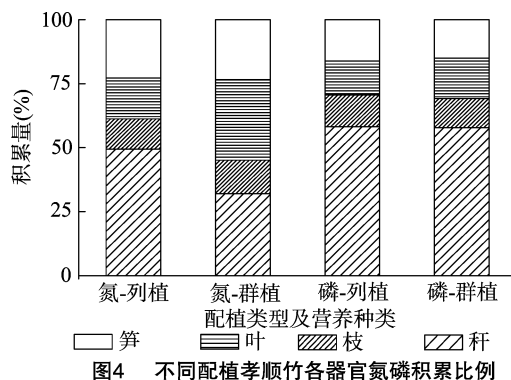


图4 不同配植孝顺竹各器官氮磷积累比例

从 2 种配植孝顺竹各器官氮磷比与各器官氮磷含量及土壤有效养分含量的相关性分析结果可以发现,群植孝顺竹各器官氮磷比值分别与其他各器官(除笋外)氮、磷含量均无显著相关性,因此用各器官的氮磷比均无法准确表征植株的生长养分情况;列植枝氮磷比值分别与笋磷、叶氮、枝氮含量均呈显著正相关关系,在一定程度上可以用来代表植株的状态。

而各器官氮磷比与土壤碱解氮、有效磷含量以及土壤有效氮磷比关系各不相同,群植模式下叶、枝氮磷比均与土壤碱解氮含量及土壤有效氮磷比呈显著或极显著相关关系,而列植模式相关性则弱一些。因此,仅使用叶片氮磷含量比值无法准确表示土壤养分及植株生长状态,对于孝顺竹这类生长快速的植物,特别是列植模式,在人为干预下,植株组分因受到破坏而不完整,枝秆的养分情况及化学计量特征对于整个植株的生长状态更具有代表性。

4 结论

在2种配植模式下,土壤有效养分含量差异较大,列植模式养分流失较多,且具有降低氮、磷等养分有效性的作用,而群植模式更有利于土壤养分循环。

修枝、钩梢等列植经营措施在一定程度上促进了氮素在孝顺竹枝秆中的积累,而降低磷素的分配。

对于孝顺竹等竹类植物,枝、秆等部位的氮磷化学计量特征较叶片对植株的生长状态更具代表性,尤其是在人为修枝、钩梢等干扰模式下。

参考文献:

- [1] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540 – 550.
- [2] Sterner R W, Elser J J. *Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere* [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [3] 姜沛沛, 曹 扬, 陈云明, 等. 陕西省3种主要树种叶片、凋落物和土壤N、P化学计量特征[J]. *生态学报*, 2017, 37(2): 443 – 454.
- [4] 庞 丽, 周志春, 张 一, 等. 大气氮沉降提高低磷土壤条件下马尾松菌根共生和磷效率的原因[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 225 – 235.
- [5] 王 敬, 程 谊, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53(2): 292 – 304.
- [6] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(3): 523 – 534.
- [7] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 等. 河口湿地植物活体 – 枯落物 – 土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2011, 31(23): 7119 – 7124.
- [8] Gusewell S. N : P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243 – 266.
- [9] Han W X, Fang J Y, Guo D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377 – 385.
- [10] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 11001 – 11006.
- [11] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, et al. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen – phosphorus interactions[J]. *Ecological Applications*, 2010, 20(1): 5 – 15.
- [12] Yan K, Duan C Q, Fu D G, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of plant communities in geochemically phosphorus –

- enriched soils in a subtropical mountainous region, SW China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(5): 3867 – 3876.
- [13] 甘 露, 陈伏生, 胡小飞, 等. 南昌市不同植物类群叶片氮磷浓度及其化学计量比[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(3): 344 – 348.
 - [14] 郭宝华, 刘广路, 范少辉, 等. 不同生产力水平毛竹林碳氮磷的分布格局和计量特征[J]. *林业科学*, 2014, 50(6): 1 – 9.
 - [15] 蒋俊明, 费世民, 李吉跃, 等. 苦竹各器官主要营养元素分布及采伐的养分输出[J]. *四川林业科技*, 2007, 28(2): 15 – 19.
 - [16] 郭子武, 陈双林, 杨清平, 等. 雷竹林土壤和叶片N、P化学计量特征对林地覆盖的响应[J]. *生态学报*, 2012, 32(20): 6361 – 6368.
 - [17] 郭子武, 胡俊靖, 杨清平, 等. 林地覆盖经营对雷竹叶片非结构性碳水化合物与氮、磷关系的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 1064 – 1070.
 - [18] 王 怡, 陈宏志, 符 饶, 等. 纳溪区孝顺竹各器官生物量分配特征[J]. *四川林勘设计*, 2015(2): 48 – 51.
 - [19] 袁金玲. 孝顺竹遗传多样性、再生体系构建及杂交育种研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
 - [20] 王 刚, 周本智, 李晓靖, 等. 吊丝单竹林生态系统碳储量及其垂直空间分配特征[J]. *热带亚热带植物学报*, 2012, 20(1): 72 – 77.
 - [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 83 – 85, 243 – 244.
 - [22] 郭宝华. 不同生产力水平毛竹林碳氮磷生态化学计量特征研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
 - [23] 叶 晶, 葛高波, 应雨骐, 等. 青皮竹地上部营养元素的吸收、积累和分配特性研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(1): 164 – 170.
 - [24] 叶仲杰, 柴锡周. 浙江林业土壤[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1986.
 - [25] 李 艳. 刈割、施肥对高寒草甸土壤、植物N、P化学计量特征的影响[D]. 西安: 陕西师范大学, 2014: 48 – 50.
 - [26] 张梅坤. 2年生麻竹地上部营养元素的吸收积累与分配[J]. *亚热带水土保持*, 2015, 27(3): 48 – 50, 56.
 - [27] 王丽华, 刘 尉, 王金牛, 等. 不同刈割强度下草地群落、层片及物种的补偿性生长[J]. *草业学报*, 2015, 24(6): 35 – 42.
 - [28] 包乌云, 赵萌莉, 红 梅, 等. 刈割对人工草地产量和补偿性生长的影响[J]. *中国草地学报*, 2015, 37(5): 46 – 51.
 - [29] 王 梅, 付秀琴, 石福孙, 等. 刈割对南方草地植物补偿性生长的影响 – 以渝东北部岐山草场为例[J]. *应用与环境生物学报*, 2014, 20(3): 474 – 483.
 - [30] 刘西军, 黄庆丰, 徐小牛, 等. 修枝对滩地杨树生长和养分的短期影响[J]. *安徽林业科技*, 2012, 38(2): 34 – 39.
 - [31] 杨清培, 欧阳明, 杨光耀, 等. 竹子生态化学计量学研究: 从生物学基础到竹林培育学应用[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(3): 264 – 278.
 - [32] 赵亚芳, 徐福利, 王渭玲, 等. 华北落叶松针叶碳、氮、磷含量及化学计量比的季节变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(5): 1328 – 1335.
 - [33] 杨清培, 杨光耀, 宋庆妮, 等. 竹子扩张生态学研究: 过程、后效与机制[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(1): 110 – 124.
 - [34] Kleinhenz V, Midmore D J. Aspects of bamboo agronomy [J]. *Advances in Agronomy*, 2001, 74(1): 99 – 153.
 - [35] 覃其云, 唐 健, 邓小军, 等. 1年生麻竹营养元素积累与分配规律研究[J]. *西部林业科学*, 2014, 43(2): 30 – 34.