

王永鹏, 张广宇, 陈兵, 刘敏, 覃姜薇, 胡聃, 张永北. 外源性养分对土壤碳氮储量及阳春砂养分吸收效率的影响 [J]. 广东农业科学, 2021, 48(6): 54-63.

外源性养分对土壤碳氮储量及阳春砂 养分吸收效率的影响

王永鹏^{1,2}, 张广宇¹, 陈兵¹, 刘敏¹, 覃姜薇¹, 胡聃², 张永北¹

(1. 海南省农垦科学院, 海口 570100;
2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要:【目的】基于橡胶-阳春砂生态系统, 探究外源养分对林下土壤环境及作物养分转化的影响。【方法】设不施肥(CK)、施农家肥(M)、施化肥(F)、施有机肥+无机肥(O+C)4个处理, 连续2年进行养分输入, 分析土壤碳氮储量的变化以及影响阳春砂养分吸收效率的主要因素。【结果】自然生长条件下土壤碳、氮储存量和输出量随阳春砂种植年限发生了不同的变化, 其中不施肥对照2019年土壤碳、氮储量分别比2017年下降4.08%、3.57%, 植物样地上部分碳、氮储量分别显著增加32.03%、40.20%, 地下部分碳、氮储量分别显著增加35.47%、42.58%。外源养分的输入加快了作物养分吸收和土壤碳氮固化, 与CK相比, M、F、O+C处理总生物量增加显著, 增幅分别为5.52%、9.61%和11.89%; M、O+C处理土壤碳储量分别提高9.90%和12.72%, 土壤氮储量分别提高2.75%和4.09%, 差异显著; O+C处理对土壤养分转化吸收的影响最为明显, 土壤碳、氮输出量均表现为O+C > F > M > CK, 土壤碳、氮固化量均表现为O+C > M > F > CK。【结论】阳春砂长期林下栽培会造成土壤固有的碳氮储量下降, 输入外源养分能有效提升土壤碳氮储量和作物养分吸收效率, 维持土壤碳氮库容平衡, 其中有机物质起主要促进作用。

关键词: 阳春砂; 外源养分; 土壤碳氮储量; 养分吸收效率; 土壤碳氮固化量

中图分类号: S158; S567.23

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X(2021)06-0054-10

Effects of Exogenous Nutrients on Soil Carbon and Nitrogen Storage and Nutrient Absorption Efficiency of *Amomum villosum*

WANG Yongpeng^{1,2}, ZHANG Guangyu¹, CHEN Bing¹, LIU Min¹,

QIN Jiangwei¹, HU Dan², ZHANG Yongbei¹

(1. Hainan State Farms Academy of Sciences, Haikou 570100, China;

2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for
Eco-Environment Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: 【Objective】The effects of exogenous nutrients on the forest soil environment and crop nutrient transformation were explored based on rubber and *Amomum villosum* intercropping system. 【Method】Four treatments were set up in combination with the gradient fertilization experiment: no fertilizer (CK), farmyard manure (M), chemical fertilizer (F), organic fertilizer + compound fertilizer (O+C), and nutrient inputs were carried out for two consecutive years. The change of soil carbon and nitrogen storage and main factors influencing nutrient absorption efficiency of *A. villosum* under exogenous nutrients were analyzed. 【Result】Under natural growth conditions, the soil carbon and

收稿日期: 2021-03-31

基金项目: 海南省自然科学基金高层次人才项目(320RC752); 海南省重大科技项目(ZDKJ2016021)

作者简介: 王永鹏(1977—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为农业生态、土壤改良, E-mail: wangyongpeng

nitrogen storage of CK treatment decreased by 4.08% and 3.57%, the above-ground part carbon and nitrogen storage increased significantly by 32.03% and 40.20%, and the underground part carbon and nitrogen storage by 35.47% and 42.58% from 2017 to 2019, respectively. The input of exogenous nutrients accelerated crop nutrient absorption and soil carbon and nitrogen solidification. Compared to CK, it was found M, F and O+C treatments improved total biomass by 5.52%, 9.61% and 11.89%, meanwhile, M and O+C treatments improved soil carbon storage by 6.96% and 8.14% and soil nitrogen storage by 3.15% and 3.43% in 2019, respectively, with significant differences. O+C treatment had the most obvious impact on the conversion and absorption of soil nutrients, and the outputs of soil carbon and nitrogen were showed as O+C>F>M>CK, and the amounts of soil carbon and nitrogen solidification were showed as O+C>M>F>CK. 【 Conclusion 】 The analysis results show that the long-term understory intercropping of *A. villosum* will cause the inherent soil carbon and nitrogen storage consumption of the rubber plantation, and exogenous nutrients can effectively increase soil carbon and nitrogen storage and nutrients absorption efficiency and maintain the balance of soil carbon and nitrogen storage. In particular, organic matter plays a positive role in protecting ecological benefits and maintaining sustainable development of soil fertility.

Key words: *Amomum villosum*; exogenous nutrient; soil carbon and nitrogen storage; nutrient absorption efficiency; soil carbon and nitrogen solidification

【研究意义】有机碳氮是土壤肥力的物质基础，也是表征土壤质量的重要指标，其丰缺度直接影响土壤生态系统的生产力及稳定性^[1-2]。通过外源养分有效增加土壤碳氮储量，延缓园林地力衰退，通过立体复合栽培，充分利用林下空间，改善环境生态，是现代农林业可持续发展的重要技术措施。【前人研究进展】生态系统中土壤碳氮的储存量受土地管理方式，地表植被覆盖等农业生产活动的影响^[3]。土地管理方式对土壤碳氮的影响主要是通过外源养分的输入^[4]、土壤物理和生物化学属性的变化决定的^[5]。长期施用外源有机物质能够提升土壤碳、氮库容，增强土壤肥力，促进作物增产，是土壤固碳的有效途径^[6]，原因在于外源有机物质自身带入的碳、氮量增加，既可满足作物生长对养分的需求，又可调节土壤腐殖质分解速率，其缓效特点可将肥力延后一段时期后释放^[7-8]。同时，通过土壤氮素固定可以降低氮肥施用量和施肥成本，提高土壤供氮潜力，保护环境免受氮素流失的负面影响^[9]。此外，氮素的添加可通过增加土壤碳素的输入和（在高N率下）通过减少土壤老碳的分解来促进土壤碳的储存^[10]。夏海勇等^[11]对黄潮土和砂姜黑土的研究发现，随有机物料用量的增加，有机物质在土壤中的分解率越快，碳库活度越高，而腐殖化系数则越低。盖霞普等^[12]总结北京昌平27年潮褐土定点试验发现，在施NPK的基础上增施有机肥可提升土壤累积碳、氮库容分别为26.3%~41.1%和26.2%~44.9%。阳春砂为我国“四大南药”植

物之一，药食同源^[13]，药用记载距今有1300多年历史^[14]。近几十年来，国内外学者对阳春砂进行了深入的研究，内容涉及资源、栽培、化学成分与药理、药材鉴别、品质评价等多个方面。阳春砂仁味辛性温，具有温脾止泻、化湿开胃、理气安胎、降脂降糖、抗氧化等作用^[15-16]，临床应用广，市场需求量大，但生产量一直处于供不应求的状态^[17]。当前，海南省积极推进南药产业化全岛发展，力争实现南药、黎药、中成药产值占医药工业总产值的17%以上，已建成东昌农场阳春砂仁栽培基地26.67 hm²，其他市县也有零星种植，但规模较小。【本研究切入点】要提高阳春砂区域产出，利用好外源养分投入是一个重要途径。外源养分对长期林下种植阳春砂的胶园地力维持和生态修复方面鲜有报道，值得深入研究。尤其是热带胶园土壤碳氮固存能力、养分转化效率方面更受到了极大关注。【拟解决的关键问题】由于阳春砂对50%~70%郁闭度的生长要求，主要选择原始林或人工林林下栽培。海南是全国橡胶种植最为丰富的地区，胶园空间适宜阳春砂种植。本研究通过胶-砂复合系统条件下外源养分输入试验，分析外源性养分对土壤碳氮固存及养分吸收效率的影响，找出一条既能保护生态效益又能维持地力的可持续性种植模式，为土地利用和覆盖变化对改善热带林土壤生态环境的研究提供理论基础，评价将林下阳春砂栽培纳入园林生态建设体系的可行性，以推动阳春砂在海南全省的大面积推广。

1 材料与amp;方法

1.1 研究区概况

试验点位于海南省国营东昌农场橡胶林下阳春砂栽培示范基地(110.37°E, 19.38°N), 海拔58 m, 属热带北缘沿海地带半湿润区, 具有热带和亚热带气候特点, 年均气温23.9 °C, 年蒸发量1 981 mm, 年均相对湿度87%, 年均降雨量1 735 mm; 受强热带风暴和台风影响严重, 年平均发生2.6个, 农业生产“低而不稳”。该区域属于低丘台地平原地带, 土壤类型主要为玄武岩发育而成的铁质砖红壤。试验地土壤质地为砂质壤土, 其中含砂粒(2~0.02 mm) 58.8%、粉粒(0.02~0.002 mm) 26.2%、粘粒(<0.002 mm) 15.0%, 容重1.34 g/cm³; 土壤有机质18.6 g/kg, 全氮1.19 g/kg, 速效磷4.3 mg/kg, 速效钾32.5 mg/kg, 碱解氮59.2 mg/kg, pH 4.9。

1.2 试验材料

供试肥料: (1)农家肥: N-P₂O₅-K₂O=0.5-0.5-0.4, 有机质≥15%。(2)化肥: 尿素(N≥46%), 过磷酸钙(P₂O₅≥16%), 钾肥(KCL≥17%)。(3)有机肥: 生物有机肥, 有机质≥45, 总养分(N-P₂O₅-K₂O)≥5%, 有效活菌数≥0.2亿/g; 硅钙镁钾复混肥(N-P₂O₅-K₂O=5-5-8≥18%, CaO-SiO₂-MgO=14-13-3≥30%)。

供试作物: 阳春砂品种为圆果型广东阳春道地品种, 植龄4年, 植株高度1.5~2 m。橡胶树为海南省农垦橡胶研究所选育的大规模推广橡胶品种文昌217, 树龄32年, 停止割胶。

1.3 试验方法

在示范基地基础上, 设立不同类别外源养分投入试验。小区分布为单因素随机区组排列, 试验设不施肥(CK)、施农家肥(M)、施化肥(F)、施有机肥+无机肥(O+C)4个处理, 3次重复, 小区面积48 m²(6 m×8 m), 小区间距2 m。2017年9月布置试验, 2017、2018年越冬前分别以基肥的方式进行一次性施肥, 2018、2019年阳春砂收获后(8月)分别进行样品采集, 土层采样深度20 cm, 植物样采集面积20 cm×20 cm, 检测作物生物量、土壤质地、容重、总有机碳、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、pH等指标。

施肥量: M处理按当地常规施肥量, 施入农家肥22.5 t/hm²; F处理按当地胶园测土配方施肥

量, 施入尿素570 kg/hm²、过磷酸钙910 kg/hm²、硫酸钾500 kg/hm²; O+C处理借鉴本研究前期已完成的有机肥梯度施肥试验最佳施肥量, 施入有机肥3 t/hm²、硅钙镁钾复混肥0.75 t/hm²。

1.4 测定指标及方法

土壤有机碳采用Walkley and Black重铬酸钾氧化法测定, 土壤全氮采用半微量开氏法测定, 植物全氮采用浓H₂SO₄-H₂O₂法测定^[18]。土壤容重采用环刀法测定; 作物生物量采用105 °C杀青2 h, 60 °C烘干测含水量; 土壤pH采用电极法测定(水土比为2.5:1); 土壤质地采用吸管法测定^[19]。吸收效率指作物体内碳、氮吸收总量与其供给量的比值。

土壤碳储量指单位土壤体积内容纳的土壤有机碳含量, 计算公式为:

$$TC = \rho_b \times h \times S \times TOC$$

式中, TC为土壤有机碳储量(g/m²), ρ_b 为土壤容重(g/cm³), h为土层深度(cm), S为土地面积(m²), TOC为土壤总有机碳含量(g/kg)。

土壤碳固化量为通过微生物固化存留于土壤中的部分养分, 即试验始末土壤碳、储量的增加量, 计算公式为:

$$\Delta TC = TC_1 - TC_2$$

式中, ΔTC 为土壤碳固化量(kg/hm²), TC₁为初期土壤碳固化量(kg/hm²), TC₂为终期土壤碳固化量(kg/hm²)。

养分吸收效率 = 作物总生物量(地上部分+地下部分)养分积累量 / 施入养分量

试验数据运用SPSS19.0进行处理, 用单因素方差分析(One-way ANOVA), 不同处理差异显著性采用LSD法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 外源养分输入条件下阳春砂生物量、覆盖度以及土壤容重的变化

由表1可知, 输入外源性养分2年后, 阳春砂生物量及其覆盖度增加显著, CK地上生物量和根生物量2019年比2017年分别增加1.10倍和1.15倍, 覆盖度增加1.12倍, 其生物量在自然条件下仍有小幅度增长, 说明植龄5~6年的阳春砂仍处于生长上升阶段; M、F、O+C处理地上生物量和根生物量2019年比2017年分别增加1.20~1.35倍和1.26~1.46倍, 覆盖度增加1.21~1.25倍, 以

表 1 不同外源性养分对阳春砂生物量、覆盖度及土壤容重的影响

Table 1 Effects of different exogenous nutrients on biomass and coverage of *Amomum villosum* and soil density

| 年份 Year | 处理 Treatment | 地上生物量 Above-ground biomass (t/hm ²) | 根生物量 Root biomass (t/hm ²) | 覆盖度 Coverage (%) | 土壤容重 Soil density (g/cm ³) |
|------------|-----------------|---|--|------------------------|--|
| 2017 | CK | 6.09 ± 0.10 | 1.25 ± 0.04 | 58 | 1.343 ± 0.019 |
| | M | 6.05 ± 0.11 | 1.27 ± 0.02 | 56 | 1.338 ± 0.017 |
| | F | 6.08 ± 0.04 | 1.26 ± 0.10 | 58 | 1.335 ± 0.015 |
| | O+C | 6.08 ± 0.08 | 1.26 ± 0.09 | 57 | 1.345 ± 0.014 |
| 2019 | CK | 6.72 ± 0.09d | 1.44 ± 0.03c | 65 | 1.323 ± 0.015a |
| | M | 7.28 ± 0.12c | 1.74 ± 0.05a | 68 | 1.299 ± 0.019ab |
| | F | 8.20 ± 0.12a | 1.60 ± 0.07b | 70 | 1.317 ± 0.015ab |
| | O+C | 8.13 | 1.84 ± 0.10a | 71 | 1.291 ± 0.012b |

注：同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著。

Note: Different lowercase letters after data in the same column represent significant differences.

O+C 处理增幅最大。2019 年，M、F、O+C 处理阳春砂地上生物量比 CK 分别高 8.35%、22.04% 和 21.09%，根生物量比 CK 分别高 20.94%、11.02% 和 27.67%，表明外源性养分对阳春砂生物量的影响均达到显著效果；O+C 处理土壤容重比 CK 低 2.39%，差异显著，表明有机肥 + 无机肥搭配施肥模式，改善了胶园表层土壤的疏松度和空隙度，降低胶园土壤的容重，提高了土壤的可耕性及通气性，有利于阳春砂长期复合栽培。

2.2 外源养分输入条件下土壤有机碳、全氮及其储量的变化

由表 2 可知，2017 年到 2019 年试验期间，M、O+C 处理土壤有机碳、全氮含量显著增加，土壤有机碳含量分别提高 9.32% 和 13.16%，土壤全氮含量分别提高 5.82% 和 8.40%。2019 年，M、F、O+C 处理土壤有机碳含量比 CK 分别高 11.99%、3.70% 和 15.54%，全氮含量比 CK 分别高 7.74%、4.13% 和 9.91%。其中，M、O+C 处理与 CK 差异显著，F 处理全氮含量显著高于 CK，但有机碳含量没有显著变化，这一定程度上说明土壤有机碳含量的提高主要来自于有机性外源养分的输入，而全氮含量的提高主要来自于无机性外源养分的输入。

由表 3 可知，CK、M、O+C 处理土壤有机碳储量 2019 年比 2017 年增幅分别为 -4.08%、6.16% 和 8.63%，全氮储量增幅分别为 -3.57%、2.75% 和 4.09%，F 处理没有显著变化。2019 年，M、O+C 处理土壤有机碳储量比 CK 分别高 9.90% 和

表 2 不同外源养分对土壤总有机碳 (TOC) 和全氮 (TN) 含量的影响

Table 2 Effects of different exogenous nutrients on soil total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) content

| 年份 Year | 处理 Treatment | TOC (g/kg) | TN (g/kg) | 碳氮比 C : N ratio |
|------------|-----------------|---------------|---------------|--------------------|
| 2017 | CK | 11.7 ± 0.3A | 1.18 ± 0.01A | 9.97 ± 0.34 |
| | M | 11.7 ± 0.5B | 1.18 ± 0.03B | 9.98 ± 0.17 |
| | F | 11.7 ± 0.3A | 1.17 ± 0.05B | 9.97 ± 0.64 |
| | O+C | 11.7 ± 0.5B | 1.17 ± 0.04B | 9.99 ± 0.44 |
| 2019 | CK | 11.4 ± 0.1Ab | 1.15 ± 0.02Ac | 9.92 ± 0.12b |
| | M | 12.8 ± 0.4Aa | 1.24 ± 0.03Aa | 10.31 ± 0.10ab |
| | F | 11.9 ± 0.4Ab | 1.20 ± 0.01Ab | 9.87 ± 0.15b |
| | O+C | 13.2 ± 0.6Aa | 1.27 ± 0.02Aa | 10.42 ± 0.38a |

注：同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著。

Note: Different lowercase letters after data in the same column represent significant differences.

表 3 不同外源性养分对土壤碳氮储量的影响

Table 3 Effects of different exogenous nutrients on soil organic carbon storage and soil nitrogen storage

| 年份 Year | 处理 Treatment | 土壤有机碳储量 Soil organic carbon storage (kg/m ²) | 土壤全氮储量 Soil nitrogen storage (kg/m ²) |
|------------|-----------------|--|---|
| 2017 | CK | 3.16 ± 0.11 | 0.317 ± 0.001 |
| | M | 3.14 ± 0.15 | 0.314 ± 0.010 |
| | F | 3.12 ± 0.11 | 0.314 ± 0.002 |
| | O+C | 3.14 ± 0.12 | 0.315 ± 0.007 |
| 2019 | CK | 3.03 ± 0.03b | 0.305 ± 0.001c |
| | M | 3.33 ± 0.06a | 0.323 ± 0.003b |
| | F | 3.12 ± 0.07b | 0.316 ± 0.002b |
| | O+C | 3.41 ± 0.11a | 0.328 ± 0.002a |

注：同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著。

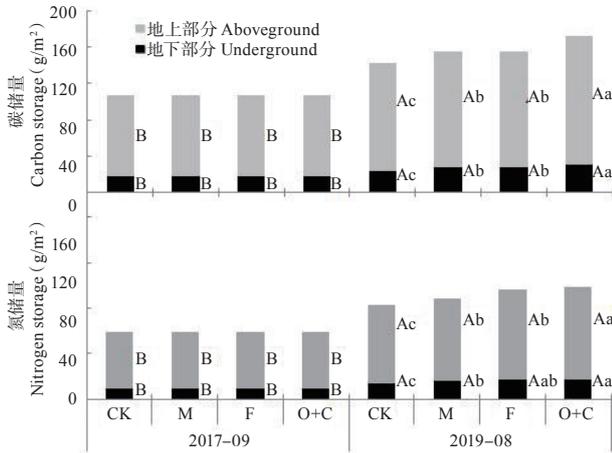
Note: Different lowercase letters after data in the same column represent significant differences.

12.72%，土壤全氮储量分别高 5.76% 和 7.27%，差异均达显著水平，说明阳春砂长期复合栽培造成胶园土壤碳氮储量下降，外源性养分输入有机肥对土壤碳氮储量增益显著，而化肥输入则影响不明显。

2.3 外源养分输入条件下土壤碳、氮输出量的变化

由图 1 可知，CK 处理阳春砂地上部分和地下部分生物量的碳、氮储量 2019 年显著高于 2017 年，其中，地上部分碳、氮储量分别高 32.03% 和 40.20%，地下部分碳、氮储量分别高 35.47% 和 42.58%，说明自然生长条件下，5~6 年阳春砂生长旺盛，在无外源养分输入的情况下，植物生物量碳氮储量以消耗土壤固有碳氮储量为主。

2019 年阳春砂收获时，M、F、O+C 处理地上部分碳储量分别比 CK 高 7.80%、8.13% 和 22.79%，地下部分碳储量分别比 CK 高 14.60%、



A: 碳储量; B: 氮储量 A: Carbon storage; B: Nitrogen storage
小写英文字母不同者表示差异显著
Different lowercase letters represent significant differences

图1 不同外源养分条件下阳春砂地上、地下生物量的变化
Fig. 1 Changes of aboveground and underground biomass of *Amomum villosum* under different exogenous nutrients

15.19% 和 28.38%; M、F、O+C 处理地上部分氮储量分别比 CK 高 5.77%、15.45% 和 21.20%，地下部分氮储量分别比 CK 高 11.95%、23.56% 和 26.89%。可见，3 个处理总的碳、氮储量（地上

+ 地下）均高于 CK，且差异显著，说明外源输入对植物生物量碳氮储量的增加起到了显著效应。

2.4 外源养分输入条件下土壤碳氮固化及作物养分吸收的变化

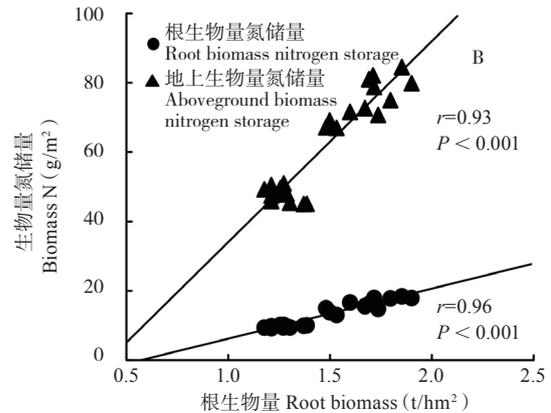
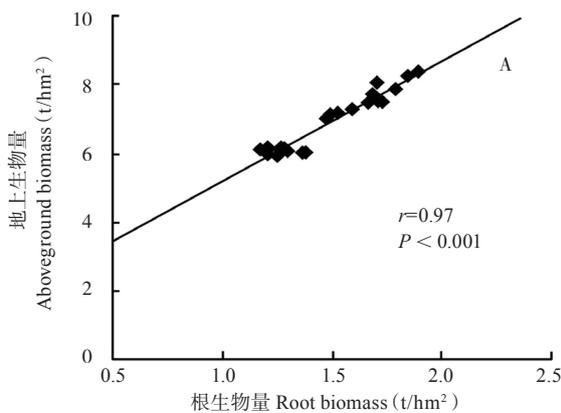
由表 4 可知，土壤碳、氮含量的变化因外源输入不同表现出较大的差异，其中土壤总有机碳输入量表现为 O+C > M > F > CK，土壤全氮输入量则表现为 O+C > F > M > CK；土壤碳、氮输出量均表现为 O+C > F > M > CK；碳吸收效率以 F 处理最高(18.6%)，O+C 处理次之(10.0%)，M 处理最低(8.5%)；氮吸收效率 F 和 O+C 处理(6.4%) 高于 M 处理(5.8%)。土壤碳、氮固化量为通过微生物固化存留于土壤中的部分养分，即试验始末土壤碳、氮储量的增加量，均表现为 O+C > M > F > CK。

2.5 外源养分输入条件下阳春砂根生物量与地上生物量及生物量碳氮储量的相关性

由图 2 可知，阳春砂根生物量与地上生物量呈显著正相关，根系生物量的增加反映不同处理间地上生物量的变化，其中 CK、M、F 和 O+C 处

表 4 不同外源养分对土壤碳氮输入、输出、固化量及养分吸收效率的影响
Table 4 Effects of different exogenous nutrients on input, output, solidification and absorption efficiency of soil carbon and nitrogen

| 处理 Treatment | 碳输入量 C input (kg/hm ²) | 碳输出量 C output (kg/hm ²) | 碳固化量 C solidification (kg/hm ²) | 碳吸收效率 C absorption efficiency (%) | 氮输入量 N input (kg/hm ²) | 氮输出量 N output (kg/hm ²) | 氮固化量 N solidification (kg/hm ²) | 氮吸收效率 N absorption efficiency (%) |
|-----------------|--|---|---|---|--|---|---|---|
| CK | 0 | 34.8 | -261 | | 0 | 23.8 | -14 | |
| M | 568 | 48.2 | 1873 | 8.5 | 513 | 29.9 | 81 | 5.8 |
| F | 257 | 47.8 | 23 | 18.6 | 600 | 38.3 | 28 | 6.4 |
| O+C | 696 | 69.3 | 2188 | 10.0 | 675 | 42.6 | 87 | 6.4 |



A: 地上生物量; B: 生物量氮储量 A: Aboveground biomass; B: Biomass nitrogen storage

图2 阳春砂根系生物量、地上生物量与生物量氮储量的相关性

Fig. 2 Correlation between root biomass and aboveground biomass and biomass nitrogen storage of *Amomum villosum*

理根生物量与地上生物量占比分别为 21.40%、23.88%、19.47% 和 22.56%；根生物量与地上、地下生物量氮储量也呈显著正相关，根系生物量的增加反映阳春砂生长过程中对氮素吸收量的变化。

3 讨论

3.1 外源养分输入对阳春砂生物量的影响

阳春砂为浅根作物，根系主要分布在 0~15 cm 土层。由于阳春砂的不定根和支持根较少，匍匐茎对植株的支撑和固定作用很大，因此本试验将根和匍匐茎合并采集统一为根生物量，地下部分只取 0~20 cm 土层植物样。另外，阳春砂生理结构特殊，自然结实率极低，没有人工授粉的情况下，收集到的干果平均每 667 m² 仅有 8.7 kg，果实生物量占比 0.02，茎生物量占比 0.82，这与王宪东等^[20]、彭建明等^[21]、冯志立等^[22]的研究结果相似，因此本试验将砂仁与地上茎叶合并统一为地上生物量。有研究表明，阳春砂种植后 3~5 年为生长高峰期，8~10 年后，由于营养繁殖减弱和衰老株的不断死亡，生物量会随之降低^[23-25]。本研究中，不施肥对照在 2017—2019 年生长期间阳春砂总生物量显著增加 10.97%（表 1），说明阳春砂在 5~6 年种植期生长速度仍然较快，同时也说明海南热带沿海区高温湿润的自然条件完全适合阳春砂的引进和长期栽培。

本研究中，CK、M、F、O+C 处理阳春砂总生物量 2019 年比 2017 年分别增加 10.97%、23.68%、33.38% 和 35.87%；2019 年，M、F、O+C 处理总生物量显著高于 CK 11.18%、20.10% 和 22.25%，且以 O+C 处理最理想，即有机、无机外源养分搭配施用对阳春砂生物量增长的效果最优。说明外源性养分输入能有效加快作物生长，显著提高作物生物量，但养分输入量及单一元素影响方式目前尚不明确，还需做进一步研究。

优良的根系性状是作物氮素高效吸收和提高产量的重要基础。本研究中，阳春砂根生物量与地上生物量、根生物量氮储量、地上生物量氮储量之间均呈显著正相关，说明阳春砂发达的根系对养分吸收利用及优质高产至关重要。研究表明，植物根系易受植物种类和环境条件等多种因素的影响，在土壤逆境胁迫下，植物通过调节根系形态、生理可塑性来适应土壤环境的变化，而根系

大小、空间分布及其活性强弱等决定了植物对土壤养分的吸收利用及其在群落中的丰富度^[26-27]。

3.2 外源养分输入对土壤有机碳、氮及其储量的影响

土壤有机碳是土壤养分转化的核心，对提高土壤养分的速效性和维持土壤养分的稳定性非常重要^[28]。本试验结果显示，无机性外源养分（F 处理）对土壤碳、氮储量影响不显著，有机性外源养分（M、O+C 处理）则显著促进了土壤碳、氮积累。可以看出，F 处理土壤全氮含量显著提高 4.13%，土壤全氮储量增加 4.35%，说明无机性外源养分的施入增加了氮源，提高了土壤微生物活性和养分的有效性，其利用率较低的原因可能是大量的无机氮在土壤中除了供给当季作物吸收利用外，部分氮素以 N₂O、N₂ 或其他形式进入大气或淋溶下渗而损失，在土壤中的净残留量很少，因此对土壤的供氮能力影响不大，其中氮吸收效率最大仅为 6.4%；同时，土壤中无外源有机物质的投入，碳源不足可能限制了微生物的生长繁殖，使得被微生物进行生物固持作用而固定的氮大大减少。M、O+C 处理相较于 CK，土壤有机碳含量提高 11.99%~15.54%，土壤有机碳储量增加 9.90%~12.72%，说明有机外源养分的输入直接增加了土壤中碳源的投入。有研究表明，微生物活动需要保持相应的 C/N 平衡，因此只能从土壤中吸取部分氮素以补不足，出现与植物争氮的现象，同时，较低的氮输入量使土壤微生物所需的有效氮含量不足而延缓土壤有机碳的周转^[29-30]。本研究中，F 处理土壤 C/N 比 CK 低 0.05，M、O+C 处理土壤 C/N 分别比 CK 高 0.39 和 0.50，说明不同施肥处理对土壤碳、氮含量的相对影响。O+C 处理中，有机外源养分和无机外源养分配施使养分供应协调，引进外源有机质的同时增加氮素的投入，生物固持作用加强，使养分供应与作物的吸收转化相协调，减少了化肥在土壤中的损失，从而使 C/N 相对趋于稳定。因此，有机无机肥配合施用对于加强土壤固碳、固氮能力具有重要意义。

土壤有机碳库、氮库受以植物地上残体、根系沉积、外源投入为主的碳、氮输入和微生物分解、侵蚀、淋失等过程中碳、氮输出的影响。土壤碳、氮含量并不能直接反映土壤碳、氮储量的变化，而单位面积碳、氮储量是反映不同施肥

条件下土壤生态系统碳、氮蓄积量变化的理想指标^[31-32]。本研究中,输入外源养分2年后,不同处理间土壤碳、氮储量大小均表现为 $O+C > M > F > CK$ 。自然条件下,CK的土壤碳、氮储量分别下降4.08%和3.57%,减少的养分除部分损失外,主要供作物吸收利用,外源输入只有橡胶凋落物,降解很慢,短期内难以回补土壤输出的有机质;M、O+C处理的土壤碳、氮储量分别增加0.30~0.38 kg/m²和0.18~0.23 kg/m²,明显高于CK,说明有机性外源养分能有效维持土壤碳库、氮库平衡,在提升地力方面可以弥补无机性外源养分的不足,这与王伯仁等^[33]、颜雄等^[34]研究结果相似。

3.3 外源养分输入对土壤养分转化的影响

外源养分利用是为了提高作物产出,在通过养分输入实现作物稳产高产的同时,还需兼顾养分资源的优化管理及养分高效利用^[35-36]。相关研究表明,有机物料可以向土壤输入有机质,而无机物料则可以通过影响土壤微生物活性及作物生长而影响土壤有机质含量及其结构^[6, 37-38]。本研究中,养分输入2年后,F处理阳春砂总生物量碳、氮储量提高44.72%、65.93%,说明输入无机性肥料时,在微生物活动的作用下养分转化速率加快,促进作物碳氮积累。作物养分加快吸收的同时,土壤中可能会出现另一种结果,即随着微生物活动增加,土壤中原有的有机质降解增多,因无外源碳输入,土壤有机碳、氮含量降低,有机质腐殖化程度下降,关于微生物在养分转化中所起的具体作用还没有取得明确的数据,有待下一步继续研究。输入有机性肥料时,对应处理(M、O+C)的阳春砂总生物量碳储量提高45.54%~65.44%,增加的有机质经降解产生的N容易被作物吸收利用,因此土壤氮素含量不高,而有机碳含量较高,即土壤有机质腐殖化程度增强。有机与无机性肥料配合施用,微生物及作物首先利用施入的无机养分,在加快作物养分吸收利用的同时,减缓微生物对有机质的降解作用,增加土壤有机质储量。

土壤有机质输入和输出之间的平衡决定土壤碳、氮储量的大小。土壤碳、氮固化量为一定时期内碳、氮储量的变化值,反映了土壤截留养分的能力,土壤碳、氮固定和积累关系着土壤肥力的保持与提高,从而影响作物的产量与质量^[39]。本

试验中,CK的土壤碳、氮固化量(-261 kg/hm²、-14 kg/hm²)均为负值,说明自然条件下,阳春砂生长需要消耗土壤固有养分,易造成地力亏缺。M、F、O+C处理的氮固化量为28~87 kg/hm²,表明土壤中氮素主要来源于外源输入;碳固化量则主要来源于外源有机物料的输入,F处理碳固化量只有23 kg/hm²,说明施用无机性肥料对土壤碳素转化的影响不明显;M、O+C处理的碳固化量分别为1 873 kg/hm²和2 188 kg/hm²,远高于投入量,说明施用有机肥料或有机无机肥料配合施用情况下土壤有机碳除了外源有机质的降解产生外,还来源于土壤微生物活动,具有较强的自生性,对土壤碳氮平衡有较强的维持力,大大提升复合栽培地力的可持续性。

碳、氮吸收效率指作物体内碳、氮吸收总量与其供给量的比值,反映作物根系从土壤中吸收养分的能力^[40-41]。本试验中,氮素吸收效率仅为5.8%~6.4%,其主要原因可能是所有肥料均为地表撒施,没有覆土,海南地区高温多雨,尿素在转化前是分子态,不能被土壤吸附,易随水流失,转化后形成的氨也极易挥发,造成大量氮素流失。同时,氮肥在土壤中转化为硝态氮和铵态氮,淋溶作用下极易下移,阳春砂根系浅,很难吸收到深层土壤中的养分。研究表明,氨挥发是田间氮损失的重要途径之一,因表面撒施造成的氨挥发损失占氮肥投入量的10%~40%,严重时氨挥发损失超过氮总损失量的80%^[42-43]。综合国内部分地区主要作物上进行的田间原位观测结果,无机肥料中的氮除去作物吸收利用和氨挥发损失外,其中硝化-反硝化损失34%,淋洗损失2%,径流损失5%^[44]。

4 结论

本研究结果表明,自然条件下阳春砂生长良好,适宜大面积种植,但长期林下栽培会造成土壤碳氮储量下降。外源性养分输入对土壤碳氮储量及作物养分吸收效率有一定的辅助作用,有助于维持土壤碳氮库容平衡以及土地生产的稳定性,影响程度因外源性养分的不同而异。

无机性外源养分在短期内的生产效果明显,可以快速提高养分吸收效率,增加阳春砂生物量。但其增加值是以消耗土壤固有养分为代价,对土壤碳氮储量贡献不显著,碳氮库容平衡需要不断

的外源投入才能得以维持。

有机性外源养分输入在短期内对土壤氮储量没有显著影响,从长远看,有机性外源养分对土壤固碳、固氮能力高于无机性外源养分,一定程度上可以弥补由于人为或自然因素造成土壤有机质下降带来的负面影响,有利于土壤肥力的提升。

在有机和无机两种外源性养分配合使用情况下,既可以加快有机质矿化,促进养分吸收,也可以增加土壤陆源性碳氮储量,无论是提高阳春砂产出效益,还是维持土壤地力持续性,都是最佳的外源养分利用方式。

参考文献 (References) :

- [1] MACBEAN N, PEYLIN P. Agriculture and the global carbon cycle [J]. *Nature*, 2014,515: 351–352. DOI: 10.1038/515351a.
- [2] MIRCHOOI F, KIANI-HARCHEGANI M, DARVISHAN A K, FALAHATKAR S, SADEGHI S H. Spatial distribution dependency of soil organic carbon content to important environmental variables [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 116:106473. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106473.
- [3] ZHENG M, ZHOU Z, ZHAO P, LUO Y, MO J. Effects of human disturbance activities and environmental change factors on terrestrial nitrogen fixation [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26 (11) : 6203–6217. DOI: 10.1111/gcb.15328.
- [4] YU P, WANG X Y, YIN Y, ZHAN J Y, LEWIS B J, TIAN J, BAO Y, ZHOU W M, ZHOU L, DAI L M, LIANG E Y. Estimates of forest biomass carbon storage in Liaoning Province of Northeast China: A review and assessment [J]. *PLOS ONE*, 2014, 9 (2) : e89572. DOI: 10.1371/journal.pone.0089572.
- [5] SIX J, PAUSTIAN K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 68:4–9. DOI: 10.1016/j.soilbio.2013.06.014.
- [6] LAZCANCO C, GOMEZ-BRANDON M, REVILLA P. Short-term effects of organic and inorganic fertilizers on soil microbial community structure and function [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49 (6) :723–733. DOI: 10.1007/s00374-012-0761-7.
- [7] LI L J, YOU M Y, SHI H A, DING X L, QIAO Y F, HAN X Z. Soil CO₂ emissions from a cultivated *Mollisol*: Effects of organic amendments, soil temperature, and moisture [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 55: 83–90. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2012.12.009.
- [8] WEI W L, YAN Y, CAO J, CHRISTIE P, ZHANG F, FAN M. Effects of combined application of organic amendments and fertilizers on crop yield and soil organic matter: An integrated analysis of long-term experiments [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2016, 225: 86–92. DOI:10.1016/j.agee.2016.04.004.
- [9] 盖霞普, 刘宏斌, 翟丽梅, 杨波, 任天志, 王洪媛, 武淑霞, 雷秋良. 长期增施有机肥 / 秸秆还田对土壤氮素淋失风险的影响 [J]. *中国农业科学*, 2018, 51 (12) : 2336–2347. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2018.12.010.
- [10] GAI X P, LIU H B, ZHAI L M, YANG B, REN T Z, WANG H Y, WU S X, LEI Q L. Effects of long-term additional application of organic manure or straw incorporation on soil nitrogen leaching risk [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018,51 (12) : 2336–2347. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2018.12.010.
- [11] HUANG X M, CESAR T, DIJKSTRA F A, HUNGATE B A, GROENIGEN K J V. New soil carbon sequestration with nitrogen enrichment: A meta-analysis [J]. *Plant and Soil*, 2020, 454: 299–310. DOI: 10.1007/s11104-020-04617-x.
- [12] 夏海勇, 王凯荣, 赵庆雷, 张正. 秸秆添加对土壤有机碳库分解转化和组成的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22 (4) :386–393. DOI: 10.3724/SP.J.1011.2014.31063.
- [13] XIA H Y, WANG K R, ZHAO Q L, ZHANG Z. Effects of straw addition on decomposition, transformation and composition of soil organic carbon pool [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014,22 (4) :386–393. DOI: 10.3724/SP.J.1011.2014.31063.
- [14] 盖霞普, 刘宏斌, 杨波, 王洪媛, 翟丽梅, 雷秋良, 武淑霞, 任天志. 不同施肥年限下作物产量及土壤碳氮库容对增施有机物料响应 [J]. *中国农业科学*, 2019,52 (4) :676–689.
- [15] GAI X P, LIU H B, YANG B, WANG H Y, ZHAI L M, LEI Q L, WU S X, REN T Z. Responses of crop yields, soil carbon and nitrogen stocks to additional application of organic materials in different fertilization years [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019,52 (4) :676–689.
- [16] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典 (一部) [M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015:253.
- [17] NATIONAL PHARMA COPOEIA COMMITTEE. Chinese Pharmacopoeia (I) [M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2015:253.
- [18] LEE S H, KIM J Y, KIM H, PARK S K, Kim C Y, CHUNG S Y, CHANG G T. *Amomum villosum* induces longitudinal bone growth in adolescent female rats [J]. *Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2012, 32 (3) :453–458. DOI:10.1016/S0254-6272 (13) 60054-0.
- [19] 李丽丽, 田文仓, 刘茵, 李永杰, 曹晓霞, 张伟. 砂仁中化学成分及其药理作用的研究进展 [J]. *现代生物医学进展*, 2018,18 (22) :4390–4396.
- [20] 唐才林, 陈嘉丽, 张荣菲, 徐新军, 黄文鸿, 杨得坡, 赵志敏. 不同产地阳春砂总酚与总黄酮测定及抗氧化活性研究 [J]. *中华中医药杂志*, 2021,36 (1) :122–126.
- [21] 何国振, 高伟, 苏景, 李锦坤, 汤丽云. 药用植物阳春砂花器形态特征 [J]. *植物学报*, 2014, 49 (3) :313–321. DOI: 10.3724/SP.J.1259.2014.00313.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] BAO S D. Soil agrochemical analysis [M]. 3rd edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 农业科技出版社, 2000.

- LU R K. Soil agricultural chemistry analysis method [M]. Beijing: Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [21] 王宪东, 秦雨东, 戴翥. 南药砂仁的研究进展[J]. 中国民族民间医药, 2016, 25 (15): 37-38.
- WANG X D, QIN Y D, DAI Z. Research progress of *Amomum villosum* [J]. *Chinese Folk Medicine*, 2016, 25 (15): 37-38.
- [22] 彭建明, 李荣英, 李戈, 王艳芳. 阳春砂仁授粉特性与传粉昆虫的研究[J]. 云南中医学院学报, 2012, 35 (4): 51-55. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2723.2012.04.015.
- PENG J M, LI R Y, LI G, WANG Y F. Study on pollination characteristics and pollinating insects of *Amomum villosum* [J]. *Journal of Yunnan University of Traditional Chinese Medicine*, 2012, 35 (4): 51-55. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2723.2012.04.015.
- [23] 冯志立, 甘建民, 郑征, 冯玉龙. 西双版纳热带季节性雨林和次生林下砂仁种植的比较研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15 (8): 1318-1322.
- FENG Z L, GAN J M, ZHEN Z, FENG Y L. A comparative study on *Amomum villosum* cultivation under tropical wet seasonal rainforest and secondary forest at Xishuangbanna [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (8): 1318-1322.
- [24] 刘军民, 张丹雁, 潘超美, 徐鸿华. 生物肥料对阳春砂产量及质量的影响[J]. 广州中医药大学学报, 2005, 22 (1): 4-6. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3213.2005.01.002.
- LIU J M, ZHANG D Y, PAN C M, XU H H. Effect of biological fertilizers on the yield and quality of *Amomum villosum* [J]. *Journal of Guangzhou University of Traditional Chinese Medicine*, 2005, 22 (1): 4-6. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3213.2005.01.002.
- [25] 郑征, 冯志立, 刘宏茂, 孟盈, 甘建民. 西双版纳热带季节性雨林下种植砂仁对雨林生物量的影响[J]. 山地学报, 2001, 19 (3): 237-242. DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2001.03.008.
- ZHENG Z, FENG Z L, LIU H M, MENG Y, GAN J M. Influence of planting *Amomum villosum* in tropical wet seasonal rainforest on biomass of the rainforest in Xishuangbanna [J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, 22 (1): 4-6. DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2001.03.008.
- [26] 高雷, 刘宏茂, 崔景云, 聂泽龙, 段其武. 西双版纳热带雨林中砂仁种植的可持续性分析[J]. 应用生态学报, 2002, 13 (3): 262-266.
- GAO L, LIU H M, CUI J Y, NIE Z L, DUAN Q W. Analysis on the sustainability of *Amomum villosum* cultivation under the tropical rainforest in Xishuangbanna [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13 (3): 262-266.
- [27] 樊剑波, 沈其荣, 谭炯壮, 叶利庭, 宋文静, 张亚丽. 不同氮效率水稻品种根系生理生态指标的差异[J]. 生态学报, 2009, 29 (6): 3052-3058. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.06.034.
- FAN J B, SHEN Q R, TAN J Z, YE L T, SONG W J, ZHANG Y L. Difference of root physiological and ecological indices in rice cultivars with different N use efficiency [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (6): 3052-3058. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.06.034.
- [28] 骆宗诗, 向成华, 章路, 谢大军, 罗晓华. 花椒林细根空间分布特征及椒草种间地下竞争[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32 (2): 86-91.
- LUO Z S, XIANG C H, ZHANG L, XIE D J, LUO X H. Spatial distribution of fine roots and underground competition between Chinese prickly ash (*Zanthoxylum bungeum*) and weeds in Chinese prickly ash plantation [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32 (2): 86-91.
- [29] ZHAO Y C, WANG P, LI J L, CHEN Y R, YING X Z, LIU S Y. The effects of two organic manures on soil properties and crop yields on a temperate calcareous soil under a wheat-maize cropping system [J]. *European Journal of Agronomy*, 2009, 31: 36-42. DOI: 10.1016/j.eja.2009.03.001.
- [30] KUZUYAKOV Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42 (9): 1363-1371. DOI: 10.1016/j.soilbio.2010.04.003.
- [31] KOCHSIEK A E, KNOPS J M H. Effects of nitrogen availability on the fate of litter-carbon and soil organic matter decomposition [J]. *British Journal of Environment and Climate Change*, 2013, 3 (1): 24-43. DOI: 10.9734/BJECC/2013/1640.
- [32] CUI X Y, WANG Y F, NIU H S, WU J, WANG S P, EWALD S, JUTTA R, JURGEN F, TANG Y H. Effect of long-term grazing on soil organic carbon content in semiarid steppes in Inner Mongolia [J]. *Ecological Research*, 2005, 20 (5): 519-527. DOI: 10.1007/s11284-005-0063-8.
- [33] 乔云发, 韩晓增, 赵兰坡. 长期定位施肥对黑土碳氮储量的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2011, 27 (4): 480-484. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0068.2011.04.018.
- QIAO Y F, HAN X Z, ZHAO L P. Carbon and nitrogen reserve under Long-term fertilization conditions [J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2011, 27 (4): 480-484. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0068.2011.04.018.
- [34] 王伯仁, 李冬初, 蔡泽江, 黄晶, 秦琳. 长期不同施肥对红壤碳氮储量的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42 (4): 808-811.
- WANG B R, LI D C, CAI Z J, HUANG J, QIN L. Effect of long-term different fertilization on total nitrogen and carbon storage in red soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42 (4): 808-811.
- [35] 颜雄, 彭新华, 张杨珠. 长期施肥对红壤旱地玉米生物量及养分吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2013 (2): 120-125.
- YAN X, PENG X H, ZHANG Y Z. Effects of long-term fertilizations on maize biomass and its nutrient uptake in red soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013 (2): 120-125.
- [36] 贾武霞. 畜禽粪便施用对土壤中重金属累积及植物有效影响研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- JIA W X. Effects of livestock manure application on soil heavy metal accumulation and phytoavailability. [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [37] 乔德波. 施用有机肥对设施菜地土壤养分、重金属含量及其分布特征的影响 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2014. DOI: 10.1017/S0021859608008265.
- QIAO D B. Effects of organic fertilizer application on the accumulation

- and distribution of soil nutrients and heavy metals in greenhouse vegetable system [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2014. DOI: 10.1017/S0021859608008265.
- [38] ZHANG H M, XU M G, ZHANG F. Long-term effects of manure application on grain yield under different cropping systems and ecological conditions in China [J]. *Journal of Agricultural Science*, 2009, 147 (1): 31–42. DOI: 10.1017/S0021859608008265.
- [39] HUANG S, RUI W Y, PENG X X, HUANG Q R, ZHANG W J. Organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a subtropical paddy soil [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 86 (1): 153–160. DOI: 10.1007/s10705-009-9279-2.
- [40] JAGADAMMA S, LAL R, HOEFL R G. Nitrogen fertilization and cropping systems effects on soil organic carbon and total nitrogen pools under chisel-plow tillage in Illinois [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 95 (1–2): 348–356. DOI: 10.1016/j.still.2007.02.006.
- [41] 徐阳春, 吴小庆, 郭世伟, 沈其荣. 水稻生育后期地上部氨挥发与氮素利用效率的研究 [J]. *植物营养与肥科学报*, 2008, 14 (2): 207–212. DOI: 10.3321/j.issn:1008-505X.2008.02.002.
- XU Y C, WU X Q, GUO S W, SHEN Q R. Nitrogen use efficiency and ammonia volatilization from rice shoot in late growth stages [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14 (2): 207–212. DOI: 10.3321/j.issn:1008-505X.2008.02.002.
- [42] QIAO J, YANG L Z, YAN T M, XUE F, ZHAO D. Rice dry matter and nitrogen accumulation, soil mineral N around root and N leaching, with increasing application rates of fertilizer [J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 49: 93–103. DOI: 10.1016/j.eja.2013.03.008.
- [43] BEATTY P H, ANBESSA Y, JUSKIWI P, CARROLL R T, WANG J, GOOD A G. Nitrogen use efficiencies of spring barley grown under varying nitrogen conditions in the field and growth chamber [J]. *Annals of Botany*, 2010, 105 (7): 1171–1182. DOI: 10.1093/aob/mcq025.
- [44] 赵春波, 宋述尧, 赵靖, 张雪梅, 张越, 张松婷. 北方地区不同黄瓜品种氮素吸收与利用效率的差异 [J]. *中国农业科学*, 2015, 48 (8): 1569–1578.
- ZHAO C B, SONG S Y, ZHAO J, ZHANG X M, ZHANG Y, ZHANG S T. Variation in nitrogen uptake and utilization efficiency of different cucumber varieties in Northern China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48 (8): 1569–1578.
- [45] ZHU Z L, CHEN D L. Nitrogen fertilizer use in China – Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63: 117–127. DOI: 10.1023/A:1021107026067.

(责任编辑 邹移光)