植物营养与肥料学报 2017, 23(4): 998–1005
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.16473
http://www.plantnutrifert.org

黄腐酸钾与化肥控释袋促进桃树生长及氮肥吸收利用

张亚飞，罗静静，彭福田*，王国栋，郜怀峰
（山东农业大学园艺科学与工程学院/作物生物学国家重点实验室，山东泰安 271018）

摘要:【**目的**】腐植酸和缓 (控) 释肥已被证明可有效减少氨挥发，提高氮肥利用率。本试验将黄腐酸钾与化肥置于纸塑复合材料制备的肥料袋内以实现肥料中养分的控制释放，以期为桃园科学高效施肥提供新的手段。【**方法**】以 2 年生盆栽桃‘京青 14’(毛桃嫁接苗) 为试材，进行了普通化肥和 ^{15}N 示踪技术两个盆栽试验。在相同养分投入量和施用方法前提下，试验均设 2 个肥料处理：化肥(CF)、化肥加黄腐酸钾(CF+FA)。使用两种肥料袋：普通 80 目尼龙袋(NB，孔径 0.178 mm)；特制纸塑复合材料控释袋(PB，孔径为 0.2 mm，微孔间距 0.5 cm)，共四个处理。氨挥发用静态箱内置硼酸吸收池法采集后，用 0.005 mol/L H_2SO_4 滴定；桃幼树新梢停长后，对桃树地上部生长指标进行测量；利用 WinRHIZO 根系扫描系统分析根系的总根长、总表面积、总体积和平均直径等数据；全氮含量用凯氏定氮法测定，^{15}N 丰度用 MAT-251 质谱计测定。【**结果**】1) NB/CF+FA、PB/CF 和 PB/CF+FA 处理能够降低氨挥发总累积量，与 NB/CF 相比分别降低 14.4%、54.3% 和 63.1%；且能够降低氨挥发速率峰值并延后峰值出现的时间。2) NB/CF+FA、PB/CF 和 PB/CF+FA 处理能够提高植株氮肥利用率和土壤中氮肥残留率，分别提高 33.6%、100.5%、157.9% 和 8.6%、30.0%、39.8%。3) 与 NB/CF 相比，NB/CF+FA、PB/CF 和 PB/CF+FA 处理可以促进桃幼树的生长发育，根系的总根长、总表面积、总体积和平均直径均显著提高；根系活力分别提高 6.6%、17.5% 和 22.7%；植株干茎增量分别提高 12.2%、26.2% 和 41.8%；植株一级侧枝总长度分别提高 16.2%、35.1% 和 53.6%；植株一级侧枝茎粗分别提高 8.2%、20.8% 和 28.4%。【**结论**】与普通尼龙袋相比，黄腐酸钾与化肥置于控缓袋中，能显著减少氨挥发，增加土壤氮肥残留，提高根系活力并增加根系生物量，从而提高氮肥利用率，有利于桃树新梢生长和树势健壮。

关键词: 黄腐酸钾；袋控缓释；氮肥利用率；氮肥残留；氨挥发

Fulvic acid potassium and nutrient-controlled release paperbag enhance peach tree growth, nitrogen absorption and utilization

ZHANG Ya-fei, LUO Jing-jing, PENG Fu-tian*, WANG Guo-dong, GAO Huai-feng
(*College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an, Shandong 271018, China*)

Abstract:【**Objectives**】Fulvic acid and paper bag have been proved to be effective in reducing ammonia volatilization and improving the utilization rate of nitrogen. This project studied the combined effects of special paper-bag made for nutrient-controlled release and fulvic acid potassium on peach growth, ammonia volatilization, nitrogen absorption and utilization, in order to provide an alternative fertilization method in orchard.【**Methods**】Two-year-old ‘Jingqing14’ (wild peach, *Amygdalus persica* Linn.) seedlings were used as materials, two pot experiments were conducted separately using common urea and ^{15}N urea as N resource, respectively. Two fertilizer treatments of chemical fertilizer (CF) and chemical fertilizer plus fulvic acid potassium (FA), and two kinds of fertilizer containing bag treatments using common nylon bag with 0.178 mm of hole size (NB), and paper-plastic bag with 0.2 mm of pores and 0.5 cm intervals (PB) were set up. Volatilized ammonia was gathered inside a static box and titrated with 0.005 mol/L H_2SO_4. The above-ground growth index of

收稿日期：2016–12–21　　**接受日期**：2017–04–26
基金项目：国家现代农业产业技术体系建设专项资金项目（CARS: 31-3-03）资助。
作者简介：张亚飞（1990—），男，山东聊城人，博士研究生，主要从事果树栽培生理生态研究。E-mail：791526210@qq.com
* 通信作者 E-mail：pft@sdau.edu.cn

the peach tree was measured after new shoots stopped growing. The total root length, the total surface area, the root volume and the average diameter were analyzed by WinRHIZO root analysis system. The total nitrogen content was detected by the micro-kjeldahl method, and the ^{15}N abundance was detected by MAT-251 mass spectrometer.【**Results**】1)Compared with the NB/CF treatment, the ammonia volatilization cumulant of NB/CF+FA, PB/CF and PB/CF+FA treatments were significantly reduced by 14.4%, 54.3% and 63.1% respectively. The peak rate of ammonia volatilization was reduced, and the peak time was delayed. 2) Compared with NB/CF treatment, the nitrogen utilization rates and soil nitrogen residue rates were significantly increased by 33.6%, 100.5%, 157.9% and 8.6%, 30.0%, 39.8% respectively under the treatments of NB/CF+FA, PB/CF and PB/CF+FA. 3) Compared with NB/CF treatment, NB/CF+FA, PB/CF and PB/CF+FA treatments significantly promoted the growth and development of young peach trees. The total root length, total root surface area, total root volume and average diameter were improved significantly. The root activity were increased by 6.5%, 17.5% and 22.7% respectively. The raising of trunk straight stems was increased by 12.2%, 26.2% and 41.8%. The primary lateral branch lengths were increased by 16.2%, 35.1%, 53.6% and the primary lateral branch thickness were increased by 8.2%, 20.8%, 28.4%.【**Conclusions**】When mixed with a certain amount of fulvic acid potassium and loaded inside the specific made paper-plastic bags, the ammonia volatilization from the chemical fertilizer will be reduced significantly, and the root activity and the roots biomass will be increased, consequently, the soil nitrogen retention time, the shoot growth and tree vigor will be promoted.

Key words: fulvic acid potassium; bag-controlled release; nitrogen utilization rates; nitrogen residue; ammonia volatilization

我国在不到世界 1/10 的耕地上使用了世界 1/3 的氮肥，化肥尤其是氮肥的过量施用十分普遍[1−3]，不仅造成了资源浪费和生产成本增加，还带来了土壤质量下降、水体污染等环境问题[4−9]。氮肥的损失途径主要有氨挥发、硝化–反硝化、淋溶和径流等，其中氨挥发是氮肥气态损失的重要途径，相关研究表明，在利于氨挥发的条件下，氨挥发损失率可高达施氮量的 40%～50%[6]。因此，提高科学施肥水平，减少化学肥料用量从而提高养分的吸收利用率，将成为现代农业高产高效可持续发展的必然要求。

黄腐酸钾 (fulvic acid potassium, FA-K) 是一种黄腐酸肥料，既能对植物生长起调控作用，又能为植物生长提供钾元素。杨金娟等[10]分析认为，黄腐酸钾能有效降低土壤 pH，与无机化肥配合施用提高土壤养分有效性；庄振东等[11]研究认为腐植酸氮肥能显著提高玉米氮肥利用率，促进玉米对土壤氮素的吸收利用，显著增加土壤中氮素残留量，减少淋溶损失；党祝庆等[12]研究认为生化黄腐酸钾配施化肥能促进桃树根系生长，提高根系活力和桃幼树氮素利用率，进而促进桃树地上部的生长。

近年来袋控缓释肥因其肥效期长、养分释放速率与果树的需肥规律基本吻合的特性[13−14]，实现了养分的稳定供应，在果树生产中得到很好的应用。目前对袋控缓释肥提高氮素利用率的研究较多[15−17]，而袋控缓释肥减少氮素损失 (如氨挥发) 的研究较少。孙克君等[18]和杜雅琴等[19]研究表明包膜控释肥可以减少 NH_3 挥发量和 N_2O 的排放量，而袋控缓释肥与包膜控释肥在养分释放机理上有很多相似之处，王建等[20]在模拟试验条件下研究发现，与普通复合肥相比，袋控缓释肥能够显著延后和削减 NH_3 日排放高峰，减少 NH_3 的累积排放量和土壤氮素损失。

本实验室一直致力于袋控缓释肥中肥料芯成分的改良，而黄腐酸钾和化肥袋控缓释对桃树土壤氮肥损失和氮肥利用的研究未见报道，本研究以 2 年生盆栽桃树为试材，研究了黄腐酸钾与化肥袋控缓释对桃树生长、氮肥利用及氮肥损失的影响，旨在为桃园肥料科学施用，减少环境污染提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

本试验以 2 年生桃品种‘京青 14’(毛桃嫁接苗) 为试材，于 2016 年 3～10 月在山东农业大学园艺试验站进行。供试土壤为褐土，基本理化性状：有机质 9.06 g/kg、有效磷 36.19 mg/kg、速效钾 96.47 mg/kg、硝态氮 25.67 mg/kg、铵态氮 9.52 mg/kg、土

壤全氮 1.23 g/kg、pH 6.78。供试化肥：普通尿素 (全 N 含量 46%)、^{15}N 尿素 (上海化工研究院生产，丰度 10.21%)、磷酸氢二铵 (P_2O_5 46%，全氮含量 18%)、硫酸钾 (K_2O 含量 50%)。供试生化黄腐酸钾购自山东省潍坊市东阳化工厂，其水溶性黄腐酸含量 > 50%、全氮含量 2.8%、全磷 (P_2O_5) 含量 0.6%、全钾 (K_2O) 含量 9.7%。

袋控肥肥料袋用纸塑复合材料制成，袋宽 5 cm、袋长 7 cm，袋上正反面均匀打有微孔，微孔直径 0.2 mm，微孔间距 0.5 cm。普通复合肥料装入用 80 目 (孔径 0.178 mm) 纱网制成的相同大小的尼龙袋 (网孔大小恰好不使肥料露出，使网内肥料能与土壤完全接触)。

1.2 试验设计

试验包括普通肥料试验和 ^{15}N 尿素试验，均为盆栽试验，花盆直径为 30 cm、高为 45 cm。两个试验的试验处理方法和氮磷钾肥用量均相同，只是在 ^{15}N 尿素试验中，用 0.5 g ^{15}N 尿素代替 0.5 g 普通尿素。普通肥料试验用于氨挥发、生长指标测定，^{15}N 尿素试验用于氮肥利用率和土壤氮肥残留测定。

试验共设 4 个处理，在氮磷钾总量相同的前提下，设化肥装于普通尼龙袋内 (NB/CF)；化肥加黄腐酸钾装于普通尼龙袋内 (NB/CF+FA)；化肥装于纸塑控释袋内 (PB/CF)；化肥加黄腐酸钾置于纸塑控释袋内 (PB/CF+FA)。普通肥料试验每个处理 21 株桃树，3 株为一个小区，7 次重复，用于氨挥发、生长指标测定；^{15}N 尿素试验每个处理 6 株桃树，2 株为一个小区，3 次重复。各养分含量一致 (N、P_2O_5 和 K_2O 含量分别为 3.88 g、1.71 g 和 3.71 g)。于 2016 年 3 月 25 日定植，待桃树正常生长后 (4 月 30 日) 进行施肥试验，分别于距树干两侧 5 cm 处挖深 15 cm 的施肥穴，每个施肥穴放 1 包袋控或网包肥料。当田间持水量低于 50% 时进行灌溉，每次每盆灌水量为 2.5 L。

1.3 测定项目与方法

氨气的采集用静态吸收法[20]，将内径 30 cm、高 20 cm 的拆分塑料桶以施肥点为中心倒扣在土壤表面，塑料桶外及与树干接触处严格密封，内置盛有 200 mL 2% 硼酸和指示剂的长方形塑料盒，于 9:00～11:00 更换一次硼酸，前 30 d 每 2 d 采集一次，之后每 10 d 采集一次，直到各个处理均监测不到氨挥发。采用 0.005 mol/L H_2SO_4 滴定硼酸中所吸收的氨 (m_i)；土壤氨挥发速率和土壤氨挥发累计损失量的计算公式如下：

土壤氨挥发速率 (mg/d) = 平均每次测得的土壤氨挥发量 m_i /每次连续捕获的时间 (t)

式中，每次连续捕获的时间 (t)，前 30 d 为 2，30 d 之后为 10。

土壤氨挥发累计量 (mg) = $m_1 + m_2 + \ldots + m_i$

桃幼树新梢停长后 (2016 年 9 月 30 日) 测量新梢总长度、干茎、枝茎等生长指标；用水将根系冲洗干净，采用 TTC 法测定根系活力；采用 WinRHIZO 根系分析系统对根系进行扫描，计算根系的总根长、总表面积、总体积和平均直径。于 2016 年 10 月 5 日对 ^{15}N 尿素标记的桃幼树进行整株采样分析，将整株解析为叶片、新梢、主干、粗根 (直径 > 2 mm)、细根 (直径 ≤ 2 mm) 5 部分，然后将各部位样品按清水→洗涤剂→清水→1% 盐酸→3 次去离子水顺序冲洗后，立即在 105℃ 下杀青，随后在 75℃ 下烘干至称重，用不锈钢电磨粉碎后过 80 目筛 (孔径 0.178 mm)，装袋贮存，待测。另将盆中土烘干称重，过 60 目筛 (孔径 0.25 mm) 备用。全氮含量用凯氏定氮法测定，^{15}N 丰度由中国农业科学院农产品加工研究用 MAT-251 质谱计测定。

Ndff = (植物样品中 ^{15}N 丰度 – ^{15}N 自然丰度)/(肥料 ^{15}N 丰度 – ^{15}N 自然丰度) × 100%

氮肥分配率 = 各器官从氮肥中吸收的氮量/总吸收氮量 × 100%

氮肥利用率 = Ndff × 器官全氮量/施肥量 × 100%

土层氮肥残留率 = (Ndff × 土层全氮量)/施肥量 × 100%

氮肥表观损失率 (^{15}N) = (施氮量 – ^{15}N 测定的氮肥残留量 – ^{15}N 测定的植物吸氮量)/施氮量 × 100%

1.4 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2007 进行图表绘制，用 SPSS 19.0 软件对数据进行单因素方差分析及最小显著差异性检验 (Duncan's 新复极差法，$P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 黄腐酸钾与化肥控释袋对土壤氨挥发的影响

2.1.1 黄腐酸钾与化肥控释袋对土壤氨挥发速率的影响 由图 1 可知，普通尼龙袋处理与控释袋处理的氨挥发速率明显不同，NB/CF 和 NB/CF+FA 处理的氨挥发分别在施肥后的第 3 d 和第 7 d 达到高峰，峰值分别为 N 135.94、86.65 mg/d，之后迅速下降，逐渐趋于平缓，分别在 50 d、60 d 低于检测限；PB/CF 和 PB/CF+FA 处理的氨挥发分别在第 19 d 和第 21 d

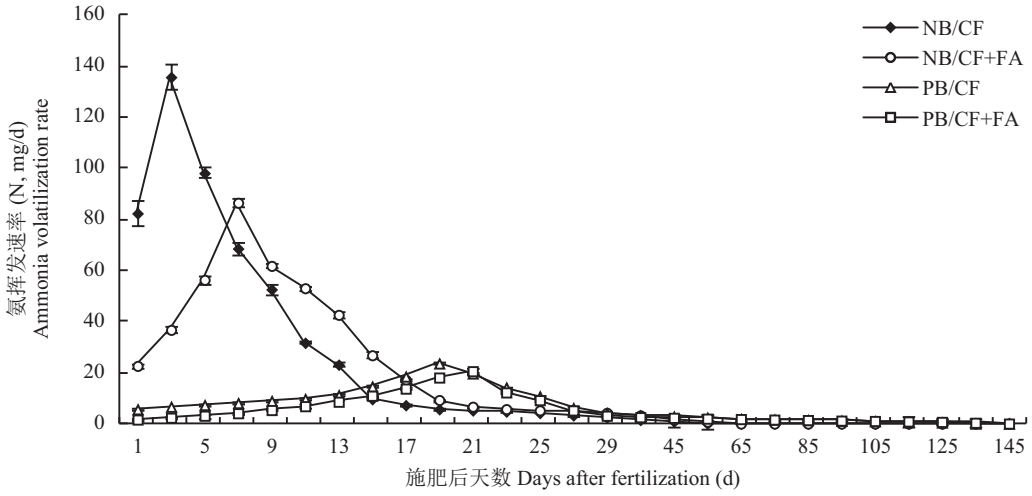

图 1　施肥后土壤氨挥发速率变化

Fig. 1　The change of ammonia volatilization rate after fertilization

[注（Note）：NB—普通尼龙袋 Common nylon bag; PB—纸塑控释袋 Paper-plastic bag; CF—化肥 Chemical fertilizer; CF+FA—化肥加黄腐酸钾 Chemical fertilizer plus fulvic acid potassium. 数据为 3 次重复平均值 The data are means of triplicates.]

达到高峰，峰值分别为 N 23.60、20.55 mg/d，之后平缓下降，分别在 130 d、140 d 低于检测限。普通尼龙袋处理的氨挥发速率峰值要显著高于控释袋处理，其中 NB/CF 处理是 PB/CF 处理的 5.75 倍，NB/CF+FA 是 PB/CF+FA 处理的 4.22 倍。与单施化肥相比，黄腐酸钾与化肥配施能够降低氨挥发速率峰值，且延后峰值出现的时间。

2.1.2　黄腐酸钾与化肥控释袋对土壤氨挥发累积量的影响　从图 2 可以看出，控释袋能够显著减少氨的

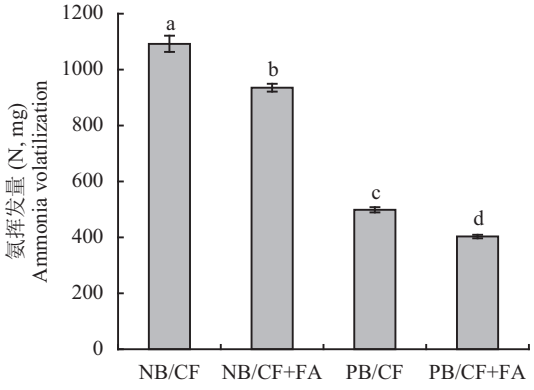

图 2　不同处理土壤氨挥发累积损失量

Fig. 2　Cumulative amount of ammonia volatilization loss under different treatments

[注（Note）：NB—普通尼龙袋 Common nylon bag; PB—纸塑控释袋 Paper-plastic bag; CF—化肥 Chemical fertilizer; CF+FA—化肥加黄腐酸钾 Chemical fertilizer plus fulvic acid potassium. 数据为 3 次重复平均值 The data are means of triplicates; 柱上不同字母表示处理间差异达 0.05 显著水平 Different lowercase letters above the bars are significantly different at 0.05 level.]

挥发损失，氮肥通过氨挥发的损失量为 NB/CF > NB/CF+FA > PB/CF > PB/CF+FA，NB/CF 处理氨累积挥发量为 1092.30 mg，显著高于其他处理。普通尼龙袋处理与控释袋处理，黄腐酸钾与化肥配施比单施化肥氨累积挥发量分别减少了 14.4% 和 19.2%；NB/CF+FA 处理和 NB/CF 处理，氨累积挥发量分别是 PB/CF+FA 和 PB/CF 处理的 2.19 倍和 2.32 倍。氨挥发是造成氮素损失的重要途径，如果不考虑本身土壤中氮素的影响，NB/CF 处理氨挥发损失占施氮量的比例最大，达到 14.1%，显著高于其他处理。NB/CF 和 NB/CF+FA 处理造成的氮素损失均值为 13.1%，而控释袋的两个处理造成的氮素损失均值为 5.8%。黄腐酸钾与化肥控释袋处理 (PB/CF+FA) 比化肥普通尼龙袋处理 (NB/CF) 氮素损失减少 63.1%。

2.2　黄腐酸钾与化肥控释袋对植株氮肥利用率的影响

由表 1 可知，不同处理桃树植株的总干物重存在显著差异，其中处理 PB/CF+FA 最高，为 236.52 g，而处理 NB/CF 为 149.37 g。不同处理各器官氮肥分配率无明显差异；NB/CF+FA、PB/CF 和 PB/CF+FA 处理桃树植株所有器官中 Ndff 均高于 NB/CF 处理，表明黄腐酸钾与肥料控释袋配合提高了桃树各器官对氮肥的吸收征调能力；NB/CF+FA、PB/CF 和 PB/CF+FA 处理的植株氮肥利用率分别为 NB/CF 处理的 1.34 倍、2.00 倍和 2.58 倍，其中 PB/CF+FA 效果最好，黄腐酸钾和化肥控释袋可以明显提高植株对氮肥的吸收利用。

表 1 不同处理氮肥利用率

Table 1 Nitrogen utilization rate under different treatments

处理 Treatment	器官 Organ	生物量 (g/plant, DW) Dry biomass	Ndff (%)	^{15}N 分配率 (%) Proportion of ^{15}N	氮肥利用率 (%) N utilization rate
NB/CF	叶 Leaf	39.60 ± 0.65 d	1.06 ± 0.01 d	60.67 ± 1.70 a	4.99 ± 0.14 d
	主干 Trunk	15.88 ± 0.45 d	2.11 ± 0.10 c	8.03 ± 0.41 c	0.66 ± 0.03 d
	新梢 New shoot	31.77 ± 0.91 d	1.35 ± 0.04 d	19.51 ± 0.16 a	1.60 ± 0.01 d
	粗根 Coarse root	59.00 ± 1.19 d	0.49 ± 0.04 c	10.65 ± 0.87 ab	0.88 ± 0.07 d
	细根 Fine root	3.12 ± 0.10 d	0.63 ± 0.09 d	1.13 ± 0.20 c	0.09 ± 0.02 d
	植株 Plant	149.37 ± 1.85 d			8.22 d
NB/CF+FA	叶 Leaf	45.43 ± 1.17 c	1.12 ± 0.02 c	59.43 ± 1.81 a	6.53 ± 0.20 c
	主干 Trunk	19.13 ± 0.80 c	2.82 ± 0.06 b	9.71 ± 0.16 a	1.07 ± 0.02 c
	新梢 New shoot	39.15 ± 0.35 c	1.41 ± 0.02 c	19.31 ± 0.32 a	2.12 ± 0.04 c
	粗根 Coarse root	67.53 ± 2.05 c	0.54 ± 0.02 c	10.16 ± 0.59 b	1.12 ± 0.06 c
	细根 Fine root	4.21 ± 0.02 c	0.70 ± 0.02 c	1.38 ± 0.06 c	0.15 ± 0.01 c
	植株 Plant	175.44 ± 0.89 c			10.98 c
PB/CF	叶 Leaf	54.32 ± 2.86 b	1.35 ± 0.07 b	60.36 ± 0.54 a	9.95 ± 0.09 b
	主干 Trunk	23.23 ± 0.25 b	2.91 ± 0.10 ab	8.90 ± 0.30 b	1.47 ± 0.05 b
	新梢 New shoot	45.81 ± 0.32 b	1.62 ± 0.05 b	18.11 ± 0.56 b	2.98 ± 0.09 b
	粗根 Coarse root	88.58 ± 1.22 b	0.65 ± 0.02 b	11.07 ± 0.31 a	1.82 ± 0.05 b
	细根 Fine root	5.34 ± 0.04 b	0.91 ± 0.05 b	1.54 ± 0.09 b	0.25 ± 0.01 b
	植株 Plant	217.29 ± 1.60 b			16.48 b
PB/CF+FA	叶 Leaf	60.76 ± 2.36 a	1.51 ± 0.04 a	61.53 ± 2.22 a	13.04 ± 0.47 a
	主干 Trunk	26.92 ± 0.21 a	3.00 ± 0.07 a	8.34 ± 0.32 c	1.77 ± 0.07 a
	新梢 New shoot	47.17 ± 0.78 a	1.75 ± 0.02 a	16.66 ± 0.34 c	3.53 ± 0.07 a
	粗根 Coarse root	95.85 ± 2.80 a	0.80 ± 0.05 a	11.65 ± 0.72 a	2.47 ± 0.15 a
	细根 Fine root	5.82 ± 0.11 a	1.21 ± 0.05 a	1.81 ± 0.09 a	0.38 ± 0.02 a
	植株 Plant	236.52 ± 2.22 a			21.20 a

注（Note）：NB—普通尼龙袋 Common nylon bag; PB—纸塑控释袋 Paper-plastic bag; CF—化肥 Chemical fertilizer; CF+FA—化肥加黄腐酸钾 Chemical fertilizer plus fulvic acid potassium. 数据为 3 次重复平均值 The data in the table are means of triplicates；同列数值后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different lowercase letters within the same column are different at 0.05 level.

2.3 黄腐酸钾与化肥控释袋对土壤中 ^{15}N 残留的影响

^{15}N 示踪技术测定的氮肥在土壤中的残留率结果(图 3) 表明，施用的氮肥有 34.6%～48.3% 残留在土壤中，NB/CF+FA、PB/CF 和 PB/CF+FA 处理与 NB/CF 相比，土壤中氮肥残留率差异达到显著水平，分别比 NB/CF 高 3.0 个百分点、10.4 个百分点和 13.8 个百分点。NB/CF+FA 处理土壤中 ^{15}N 残留率仅比 NB/CF 处理高 3.0%，但 PB/CF+FA 比 NB/CF+FA 处理土壤中 ^{15}N 残留率高 10.8 个百分点，肥料控释袋可以明显提高土壤中的 ^{15}N 残留率，原因可能是肥料控释袋养分释放慢，灌溉淋溶损失较少。

2.4 黄腐酸钾与化肥控释袋对桃幼树生长的影响

2.4.1 黄腐酸钾与化肥控释袋对桃幼树根系生长的影响 由表 2 可知，桃树植株根系总根长、总表面积、平均直径及总体积从高到低均为 PB/CF+FA > PB/CF > NB/CF+FA > NB/CF；NB/CF+FA、PB/CF 和 PB/CF+FA 处理桃树植株根系活力分别为 NB/CF 处理的 1.06 倍、1.18 倍及 1.23 倍。表明黄腐酸钾与化肥配施及肥料控释袋促进根系的大量发生，提高

根系活力，从而增加氮素吸收，增加了根系生物量。

2.4.2 黄腐酸钾与化肥控释袋对桃幼树地上部生长的影响　由表 3 可知，9 月底桃树植株干茎增量、一级侧枝总长度及茎粗从高到低均为 PB/CF+FA > PB/CF > NB/CF+FA > NB/CF。PB/CF+FA、PB/CF 和 NB/CF+FA 处理桃树植株干茎增量分别为 NB/CF 处理的 1.42 倍、1.26 倍及 1.12 倍；桃树植株一级侧枝总长度及茎粗以 PB/CF+FA 最大，分别为 443.99 cm 和 8.13 mm，分别是 NB/CF 的 1.54 倍和 1.28 倍；肥料控释袋处理能够减轻施肥对果树生长的刺激，减少二级侧枝的数量。

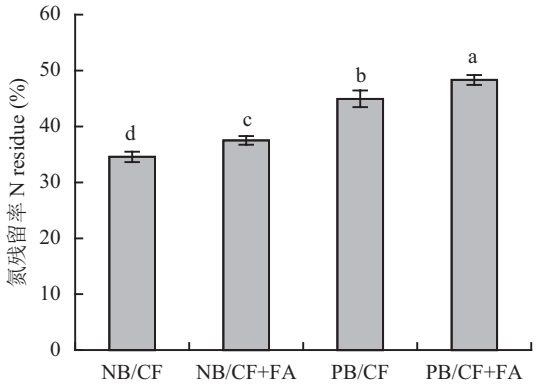

图 3　^{15}N 示踪技术测定氮肥在土壤中的残留

Fig. 3　Nitrogen residues in different soil layers using the ^{15}N tracer technology

[注（Note）：NB—普通尼龙袋 Common nylon bag; PB—纸塑控释袋 Paper-plastic bag; CF—化肥 Chemical fertilizer; CF+FA—化肥加黄腐酸钾 Chemical fertilizer plus fulvic acid potassium. 数据为 3 次重复平均值 The data are means of triplicates；柱上不同字母表示处理间差异达 0.05 显著水平 Different lowercase letters above the bars are significantly different at 0.05 level.]

3　讨论

3.1　黄腐酸钾与化肥控释袋对氮肥损失的影响

目前关于黄腐酸钾与化肥控释袋对氨挥发、硝化–反硝化作用、淋溶和径流等造成氮肥损失影响的研究相对较少。本研究结果表明，NB/CF、NB/CF+FA、PB/CF 及 PB/CF+FA 处理的氮肥表观损失率分别为 57.2%、51.5%、38.6% 和 30.5%，表明黄腐酸钾与化肥配施、袋控释技术均能减少氮素损失，且黄腐酸钾与控释袋相结合起协同效应，NB/CF+FA、PB/CF 处理氮肥表观损失率分别较 PB/CF+FA 处理提高 47.6%、26.6%。

庄振东等[11]研究认为腐植酸氮肥能显著增加土壤中氮素残留量，减少淋溶损失；王建等[20]研究发现，

表 2　不同处理桃树根系相关参数

Table 2　Roots related parameters of peach trees under different treatments

处理 Treatment	根系活力 [μg/(g·h)] Root activity	总根长 (cm) Total length	总表面积 (cm²) Total surface area	平均直径 (mm) Average diameter	总体积 (cm³) Total volume
NB/CF	116.72 ± 7.19 d	19307.84 ± 339.29 d	5459.41 ± 295.29 d	0.61 ± 0.02 c	87.28 ± 4.37 d
NB/CF+FA	123.29 ± 6.27 c	22251.71 ± 486.29 c	6057.93 ± 386.20 c	0.64 ± 0.03 b	106.50 ± 3.19 c
PB/CF	137.18 ± 4.28 b	27329.67 ± 528.10 b	7028.19 ± 238.16 b	0.70 ± 0.11 ab	130.26 ± 6.29 b
PB/CF+FA	143.17 ± 5.13 a	29148.29 ± 382.19 a	8287.21 ± 221.89 a	0.74 ± 0.08 a	152.37 ± 6.19 a

注（Note）：NB—普通尼龙袋 Common nylon bag; PB—纸塑控释袋 Paper-plastic bag; CF—化肥 Chemical fertilizer; CF+FA—化肥加黄腐酸钾 Chemical fertilizer plus fulvic acid potassium. 数据为 3 次重复平均值 The data in the table are means of triplicates；同列数值后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different lowercase letters within the same column are significantly different at 0.05 level.

表 3　不同处理对桃树地上部生长量

Table 3　Effects of different treatments on aboveground biomass of peach trees

处理 Treatment	干茎增量 (mm) Trunk straight stem increase	一级侧枝总长度 (cm) Primary lateral branch length	一级侧枝茎粗 (mm) Primary lateral branch thickness	二级侧枝数 Secondary lateral branch number
NB/CF	3.28 ± 0.07 d	289.02 ± 9.98 d	6.33 ± 0.14 d	8.89 ± 0.42 a
NB/CF+FA	3.68 ± 0.07 c	335.89 ± 11.69 c	6.85 ± 0.07 c	9.22 ± 0.42 a
PB/CF	4.14 ± 0.06 b	390.50 ± 15.07 b	7.65 ± 0.20 b	5.22 ± 0.42 b
PB/CF+FA	4.65 ± 0.10 a	443.99 ± 19.64 a	8.13 ± 0.14 a	6.11 ± 0.31 b

注（Note）：NB—普通尼龙袋 Common nylon bag; PB—纸塑控释袋 Paper-plastic bag; CF—化肥 Chemical fertilizer; CF+FA—化肥加黄腐酸钾 Chemical fertilizer plus fulvic acid potassium. 数据为 3 次重复平均值 The data in the table are means of triplicates；同列数值后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different lowercase letters within the same column are significantly different at 0.05 level.

袋控缓释肥能够减少氨累积排放量和土壤氮素损失。本试验中，PB/CF+FA 处理氨挥发累积量为 N 403.11 mg，显著低于其他处理，土壤中氮素残留率为 48.3%，显著高于其他处理。本研究中黄腐酸钾与化肥控释袋处理土壤中氮素残留率显著提高，氨挥发累积量显著降低，减少了氮肥损失。原因可能是：一方面腐植酸因含有多种活性基团而具有较强的吸附能力，可以增加对土壤铵态氮和硝态氮的吸附而减少土壤氮素淋溶，增加土壤氮素残留[11]，而且腐植酸能有效地抑制脲酶的活性[23]，而脲酶可以催化尿素水解释放出氨和二氧化碳，因而黄腐酸钾的施用可以减少氨挥发；另一方面袋控缓释肥因养分缓慢释放特性而减少了氨挥发。

3.2 黄腐酸钾与化肥控释袋对桃幼树氮肥吸收利用及生长的影响

根系是植物吸收水分和养分的主要器官，养分类型和供应方式影响土壤中养分的含量与分布，进而影响根系的生长、根系形态和分布[21]。根系对土壤养分高效利用的生物学潜力能否发挥是制约养分利用效率的直接原因。张守仕等[15]研究表明袋控缓释肥料中各种养分能被控制释放，尤其是容易被土壤固定的磷和易流失的钾，因此养分释放比较均衡，根系在生长季中一直能够吸收到足够的养分，普通的施肥方式处理只在施肥后一段时间内有足够养分可供吸收，较长时间处于养分亏缺状态，且养分不宜平衡，因此肥料置于控释袋内能够显著促进根系生长。Canellas 等[22]试验表明，从蚯蚓中提取的腐植酸能显著促进玉米幼苗根系生长和侧根发生。本研究中黄腐酸钾与化肥控释袋处理 (PB/CF+FA) 能够显著提高根系活力，增加桃幼树根构型参数，促进根系生长。

党祝庆等[12]研究表明，黄腐酸钾与化肥配施处理可以提高桃树根系活力和桃幼树生长后期抗氧化酶活性，并显著提高氮素利用率；梁太波等[24]和王汝娟等[25]研究也认为，腐植酸能提高根系活力，增强根系对养分的吸收利用。本试验中 PB/CF+FA 处理根系活力和氮肥利用率分别是 NB/CF 处理的 1.23 倍和 2.58 倍，进而促进了桃幼树地上部的生长。一方面由于黄腐酸钾和化肥控释袋减少了氨挥发，增加了土壤氮素残留，土壤中有效养分浓度稳定；另一方面黄腐酸钾和化肥控释袋提高了根系活力并增加了根系生物量，有利于养分的吸收利用。

3.3 黄腐酸钾与化肥控释袋的协同效应

化肥与黄腐酸钾配合，置于普通尼龙袋和特制控释袋内均能显著减少氨挥发、提高氮肥利用率，控释袋与黄腐酸钾配合 (PB/CF+FA 处理) 的效果最好，氨挥发总积累量比普通袋装化肥和腐植酸钾减少 19.2%；氮肥利用率是 PB/CF 和 NB/CF+FA 处理的 1.29 倍和 1.93 倍。本研究通过比较黄腐酸钾与化肥配施、袋控缓释技术对桃树生长及氮肥吸收利用的影响，发现两者相结合起到一定协同效应，其中在降低氨挥发和提高氮肥利用率方面控释袋影响更大，这也说明相对于黄腐酸钾对养分的吸附能力，肥料养分的释放方式更能影响氨挥发和氮肥利用率，在生产中可作为重要的参考。此外本试验结果在田间生产上的应用及对桃果实产量品质的影响还有待进一步研究。

4 结论

黄腐酸钾与化肥控释袋处理改变了养分的释放特性，降低了氨挥发，增加了土壤氮素残留；与单施化肥相比，显著提高根系密度，延缓根系衰老，提高植株氮肥利用率，有利于桃幼树生长健壮。相对于黄腐酸钾对养分的吸附能力，肥料养分的释放方式是影响氨挥发和氮肥利用率的主要因素。

参 考 文 献：

[1] Fan M S, Shen J B, Yuan L X, *et al*. Improving crop productivity and resource use efficiency to ensure food security and environmental quality in China[J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63: 13–24.

[2] Zhang F S, Cui Z L, Chen X P, *et al*. Integrated nutrient management for food security and environmental quality in China[J]. Advances in Agronomy, 2012, 116: 1–40.

[3] Shen J B, Li C J, Mi G H, *et al*. Maximizing root/rhizosphere efficiency to improve crop productivity and nutrient use efficiency in intensive agriculture of China[J]. Journal of Experimental Botany, 2013, 64: 1181–1192.

[4] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, *et al*. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain[J]. Environmental Pollution, 2006, 143: 117–125.

[5] Qiu S J, Ju X T, Lu X, *et al*. Improved nitrogen management for an intensive winter wheat/summer maize double-cropping system[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76: 286–297.

[6] Li C, Fmlking S, Fmlking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97: 9759–9776.

[7] 周静, 崔键, 胡峰, 等. 马唐牧草红壤氮肥的氨挥发、径流和淋溶损失[J]. 土壤学报, 2007, 44(6): 1076–1082.
Zhou J, Cui J, Hu F, *et al*. N-loss through volatilization, run off and

leaching from red soil planted with *Digitaria ischaemum*[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(6): 1076–1082.

[8] 曹兵, 贺发云, 徐秋明, 等. 南京郊区番茄地中氮肥的气态氮损失[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 62–68.
Cao B, He F Y, Xu Q M, *et al*. Gaseous losses from fertilizers applied to a tomato field in Nanjing suburbs[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(1): 62–68.

[9] 张玉铭, 张佳宝, 胡春胜, 等. 华北太行山前平原农田土壤水分动态与氮素的淋溶损失[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 17–24.
Zhang Y M, Zhang J B, Hu C S, *et al*. Nitrate leaching in wheat-maize rotation field in the North China Plain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(1): 17–24.

[10] 杨金娟, 马琨, 丁冬, 等. 不同培肥方式对旱作区耕地土壤的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(12): 75–81.
Yang J J, Ma K, Ding D, *et al*. Effects of different fertilizer management on soil in the arid region[J]. Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica, 2013, 22(12): 75–81.

[11] 庄振东, 李絮花. 腐殖酸氮肥对玉米产量、氮肥利用及氮肥损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1232–1239.
Zhuang Z D, Li X H. Effects of humic acid nitrogen fertilization on corn yield, nitrogen utilization and nitrogen loss[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(5): 1232–1239.

[12] 党祝庆, 王娜娜, 张亚飞, 等. 不同施肥模式对桃幼树根系生长及氮素吸收分配的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 171–176.
Dang Z Q, Wang N N, Zhang Y F, *et al*. Effects of different fertilization mode on root growth, nitrogen uptake and distribution of young peach trees[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(4): 171–176.

[13] 张守仕. 袋控缓释肥养分释放特性及其在桃树上的应用效果[D]. 山东泰安: 山东农业大学硕士学位论文, 2007.
Zhang S S. Nutrients release characters of bag-controlled fertilizer and its effects on peach production[D]. Taian, Shandong: MS Thesis of Shandong Agricultural University, 2007.

[14] 齐玉吉, 彭福田, 张守仕, 等. 袋控缓释肥施用量对土壤有效养分含量和桃树生长结果的影响[J]. 山东农业科学, 2014, 46(12): 57–62.
Qi Y J, Peng F T, Zhang S S, *et al*. Effects of application rate of bag-controlled release fertilizer on soil available nutrient contents and peach growth and fruiting[J]. Shandong Agricultural Science, 2014, 46(12): 57–62.

[15] 张守仕, 彭福田, 姜远茂, 等. 肥料袋控缓释对桃氮素利用率及生长和结果的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(2): 379–386.
Zhang S S, Peng F T, Jiang Y M, *et al*. Effects of bag controlled-release fertilizer on nitrogen utilization rate, growth and fruiting of peach[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(2): 379–386.

[16] 彭福田, 彭勇, 周鹏, 张守仕. 肥料袋控缓释对沾化冬枣氮素利用率与生长结果的影响[J]. 园艺学报, 2006, 33(2): 223–228.
Peng F T, Peng Y, Zhou P, Zhang S S. Effect of fertilizer being bag-controlled release on nitrogen utilization rate, growth and fruiting of Zhanhua winter date[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2006, 33(2): 223–228.

[17] 蒋晓梅, 彭福田, 张江红, 党祝庆. 肥料袋控缓释对桃树土壤酶活性及植株生长的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 279–284.
Jiang X M, Peng F T, Zhang J H, Dang Z Q. Effects of bag-controlled release fertilizer on soil enzyme activity and the growth of plant for peach trees[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 279–284.

[18] 孙克君, 毛小云, 卢其明等. 几种控释氮肥减少氨挥发的效果及影响因素研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2347–2350.
Sun K J, Mao X Y, Lu Q M, *et al*. Mitigation effect of several controlled-release N fertilizers on ammonia volatilization and related affecting factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(12): 2347–2350.

[19] 杜亚琴, 郑丽行, 樊小林. 3种控释肥在赤红壤中的氧化亚氮排放[J]. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2370–2376.
Du Y Q, Zheng L X, Fan X L. Effects of applying controlled release fertilizers on N_2O emission from a lateritic red soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(9): 2370–2376.

[20] 王建, 诸葛玉平, 彭福田, 等. 袋控肥对土壤氨挥发、氧化亚氮和二氧化碳排放的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 12(6): 294–304.
Wang J, Zhuge Y P, Peng F T, *et al*. Effect of paper package fertilizer on soil ammonia volatilization, nitrous oxide and carbon dioxide emission[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 12(6): 294–304.

[21] Lynch J P. Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorous acquisition: tools for future crops[J]. Plant Physiology, 2011, 156: 1041–1049.

[22] Canellas L P, Olivares F L, *et al*. Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H^+-ATPase activity in maize roots[J]. Plant Physiology, 2002, 130: 1951–1957.

[23] Marzadori C, Francioso O, Ciavatta C, *et al*. Activity and stability of jack bean urease in the presence of peat humic acids obtained using different extractants[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, 32(5): 415–420.

[24] 梁太波, 王振林, 刘娟, 等. 灌溉和旱作条件下腐植酸复合肥对小麦生理特性及产量的影响[J]. 中国农业生态学报, 2009, 17(5): 900–904.
Liang T B, Wang Z L, Liu J, *et al*. Effect of humate compound fertilizer on physiological characteristics and yield of wheat under irrigated and rain-fed condition[J]. Chinese Journal of Eco-Agricultural, 2009, 17(5): 900–904.

[25] 王汝娟, 王振林, 梁太波, 等. 腐植酸钾对食用甘薯品种钾吸收、利用和块根产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(3): 520–526.
Wang R J, Wang Z L, Liang T B, *et al*. Effect of HA-K fertilizer on the absorption and utilization of potassium and the storage root yield in sweet potato for table use[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(3): 520–526.