

不同施氮措施对枸杞园土壤 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响

卢九斤, 聂易丰, 魏娇娇, 盛海彦, 华明秀, 许米聪, 王永亮

引用本文:

卢九斤, 聂易丰, 魏娇娇, 等. 不同施氮措施对枸杞园土壤 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(1): 210–220.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0702>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

清液肥对滴灌棉田 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响

王方斌, 刘凯, 殷星, 廖欢, 孙嘉璘, 闵伟, 侯振安

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2354–2362 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0067>

水氮耦合对设施土壤 N_2O 和 NO 排放的影响

吕金东, 张丽媛, 虞娜, 邹洪涛, 张玉玲, 张玉龙

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1366–1376 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1217>

氮肥品种对露地蔬菜 NH_3 挥发及经济效益的影响

李晓明, 居静, 夏永秋, 钱晓晴, 颜晓元, 周伟

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1337–1343 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1482>

苏南麦田基施包膜尿素的农学和环境效应评价

孙婷, 王孟兰, 王柏淳, 李运东, 王慎强

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 1115–1123 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0472>

有机无机肥配施对苹果园温室气体排放的影响

马艳婷, 赵志远, 冯天宇, SOMPOUVISSETThongsouk, 孔旭, 翟丙年, 赵政阳

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2039–2048 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1477>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

卢九斤, 聂易丰, 魏娇娇, 等. 不同施氮措施对枸杞园土壤 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(1): 210–220.

LU J J, NIE Y F, WEI J J, et al. Effects of different nitrogen application measures on NH_3 volatilization and N_2O emissions in a wolfberry orchard[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(1): 210–220.

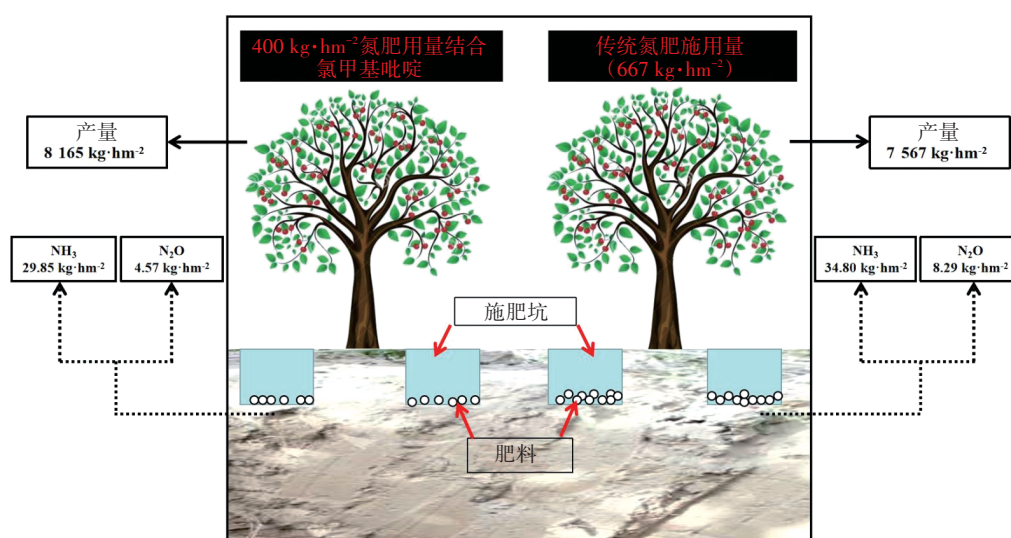


开放科学 OSID

不同施氮措施对枸杞园土壤 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响

卢九斤¹, 聂易丰¹, 魏娇娇¹, 盛海彦^{1,2*}, 华明秀¹, 许米聪¹, 王永亮³

(1. 青海大学农牧学院, 西宁 810016; 2. 省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016; 3. 青海诺木洪农场, 青海 都兰 816100)



摘要: 为明确适宜氮肥用量配施硝化抑制剂对柴达木枸杞园土壤 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响,在柴达木地区枸杞园开展研究,共设置9个处理: N_{667} 、 N_{534} 、 N_{400} 、 N_{267} 、 N_{133} 、 N_0 处理分别表示施用纯氮667、534、400、267、133、0 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $\text{N}_{400\text{I}_{2.00}}$ 、 $\text{N}_{267\text{I}_{1.33}}$ 、 $\text{N}_{133\text{I}_{0.67}}$ 处理分别表示在 N_{400} 、 N_{267} 、 N_{133} 处理基础上配施2-氯-6-(三氯甲基)-吡啶(nitrapyrin)2.00、1.33、0.67 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,采用通气法和静态暗箱法采集 NH_3 和 NO_2 ,连续流动分析仪和气相色谱仪测定气体含量。结果表明: NH_3 挥发速率与累积量均随施氮量的增加而增加,相同施氮量下配施硝化抑制剂对 NH_3 挥发无显著影响。 N_{667} 处理2019年及2020年的 NH_3 挥发速率峰值分别为0.48 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和0.57 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, NH_3 挥发累积量分别为34.49 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和35.11 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,显著高于其他处理。两年相同施氮量处理下配施与未配施硝化抑制剂处理的 NH_3 挥发累积量均无显著差异; $\text{N}_{400\text{I}_{2.00}}$ 、 $\text{N}_{267\text{I}_{1.33}}$ 、 $\text{N}_{133\text{I}_{0.67}}$ 处理较农民习惯施氮(N_{667})处理显著降低了 N_2O 排放。2019年和2020年 N_{667} 处理的 N_2O 累积排放量较 N_{400} 处理分别增加了43.10%、16.11%, $\text{N}_{400\text{I}_{2.00}}$ 、 $\text{N}_{267\text{I}_{1.33}}$ 、 $\text{N}_{133\text{I}_{0.67}}$ 处理的 N_2O 累积排放量较 N_{400} 、 N_{267} 、 N_{133} 处理降低了28.52%~41.37%。2019年和2020年 $\text{N}_{400\text{I}_{2.00}}$ 处理的产量较 N_{667} 处理显著提高了9.26%及6.67%,且净收益提高了9.80%、7.10%。研究表明,与农民习惯施氮量相比,减施氮肥且配施硝化抑制剂可显著降低 NH_3 挥发和 N_2O 排放,同时可提高枸杞产量与经济效益。施氮量为400 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 且配施nitrapyrin 2.00 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 为柴达木高肥力枸杞园较优的施氮组合。

关键词: 枸杞;施氮量;2-氯-6-(三氯甲基)-吡啶; NH_3 挥发; N_2O 排放;产量

中图分类号: S567.19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2022)01-0210-11 **doi:** 10.11654/jaes.2021-0702

收稿日期:2021-06-18 录用日期:2021-08-12

作者简介:卢九斤(1996—),女,浙江金华人,硕士研究生,从事植物营养研究。E-mail:823844150@qq.com

*通信作者:盛海彦 E-mail:xnshy26@sina.com

基金项目:青海省科技厅科技国际合作专项(2020-HZ-805);青海省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室开放基金项目(2020-KF-001)

Project supported: Science and Technology International Cooperation Project of Qinghai Provincial Department of Science and Technology (2020-HZ-805); Open Project of State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Qinghai Province (2020-KF-001)

Effects of different nitrogen application measures on NH₃ volatilization and N₂O emissions in a wolfberry orchard

LU Jiujin¹, NIE Yifeng¹, WEI Jiaojiao¹, SHENG Haiyan^{1,2*}, HUA Mingxiu¹, XU Micong¹, WANG Yongliang³

(1.College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China; 2.State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China; 3.Qinghai Nuomuhong Farm, Dulan 816100, China)

Abstract: To clarify the effects of an optimum N application rate combined with nitrification inhibitor addition on NH₃ volatilization and N₂O emissions from soil in a wolfberry orchard in Qaidam, nine treatments were conducted, i.e., N₆₆₇, N₅₃₄, N₄₀₀, N₂₆₇, N₁₃₃, and N₀ (N: 667, 534, 400, 267, 133 kg·hm⁻², and 0 kg·hm⁻², respectively) and N₄₀₀I_{2.00}, N₂₆₇I_{1.33}, N₁₃₃I_{0.67} (N₄₀₀, N₂₆₇, and N₁₃₃ treatments combined nitrapyrin with 2.00, 1.33, and 0.67 kg·hm⁻², respectively). The venting method and static chamber-gas chromatography were used to evaluate the soil NH₃ volatilization and N₂O emissions, and the gas content was determined by a continuous flow analyzer and gas chromatograph. The results showed that the NH₃ volatilization rate and accumulation NH₃ volatilization increased significantly as the N fertilizer rate increased. Nitrapyrin addition had no significant influence on NH₃ volatilization. The maximum NH₃ volatilization rate of the N₆₆₇ treatment in 2019 and 2020 was 0.48 kg·hm⁻²·d⁻¹ and 0.57 kg·hm⁻²·d⁻¹, respectively, and the NH₃ accumulation was 34.49 kg·hm⁻² and 35.11 kg·hm⁻², respectively, which were significantly higher than those in other treatments. Moreover, there was no significant difference in NH₃ volatilization accumulation between the same N application rate treatment and nitrification inhibitor addition treatment in two years. In contrast to the N fertilizer rate used by farmers (N₆₆₇), N₄₀₀I_{2.00}, N₂₆₇I_{1.33}, N₁₃₃I_{0.67} treatments significantly decreased the N₂O emissions. In comparison to the N₂O accumulation of the N₆₆₇ treatment, that of the N₄₀₀ treatment decreased by 43.09% and 16.11% in 2019 and 2020, respectively. Moreover, compared with that of the N₄₀₀, N₂₆₇, N₁₃₃ treatments, the cumulative N₂O emission of the N₄₀₀I_{2.00}, N₂₆₇I_{1.33}, N₁₃₃I_{0.67} treatments was significantly reduced by 28.52%~41.37%. The wolfberry yield of the N₄₀₀I_{2.00} treatment in 2019 and 2020 significantly increased by 9.26% and 6.67%, respectively, and the net income increased by 9.80% and 7.10%, respectively, in contrast to those of the N₆₆₇ treatment. The results indicate that compared with the N application rate used by farmers, reducing the N application and nitrapyrin addition rates can significantly decrease NH₃ volatilization and N₂O emissions. The combination of N 400 kg·hm⁻² and nitrapyrin 2.00 kg·hm⁻² is optimal to achieve a fertile wolfberry orchard in Qaidam.

Keywords: wolfberry; nitrogen application rate; nitrapyrin; NH₃ volatilization; N₂O emission; yield

我国是世界上氮肥生产和消费量最大的国家^[1],氮肥消费量占世界总消费量约30%,但氮肥的当季表观利用率仅30%~35%,过量施氮已成为农田生态系统污染的主要来源之一,也是氮肥利用率较低的重要原因^[2-3]。已有研究表明,氮肥配施硝化抑制剂可减少氮肥的气态损失,提高氮肥利用率^[4-5]。氮肥施入土壤后的去向有:作物利用约35%,NH₃挥发损失约11%,表观硝化-反硝化损失约34%,淋洗及径流损失约7%^[6]。氮肥的气态损失主要有NH₃和N₂O等形式。肥料用量、气候条件等均会影响NH₃挥发及N₂O排放,其中氮肥用量的影响最为显著^[7]。王成等^[8]对香梨的研究表明,在施氮量450 kg·hm⁻²的基础上减少33.33%的氮肥投入,NH₃挥发和N₂O损失量分别降低8.04 kg·hm⁻²和72.21 kg·hm⁻²。朱志军^[9]发现,苹果园氮肥用量较常规高氮处理减少50%时,N₂O累积排放量降低43.27%且对产量无影响。相关研究发现,添加硝化抑制剂可抑制土壤中的硝化作用,降低N₂O排放系数,减少氮肥气态损失,提高产量^[10]。也有研究发现,硝化抑制剂的施用增加了土

壤铵态氮的浓度,促进了NH₃挥发,但提高了作物产量及氮肥利用率^[11]。因此,合理施用氮肥及硝化抑制剂可提高作物的氮肥利用率,降低氮素的气态损失^[12]。

柴达木地区独特的气候条件为枸杞提供了适宜的生存环境,使得其外观品质好、营养成分高^[13-14]。柴达木枸杞种植面积自2014年的不足2万hm²发展至2018年的3万hm²,枸杞产业已成为柴达木地区的主导产业^[15]。为保证枸杞高产,种植户盲目投入大量氮肥。过量的氮肥未显著提高枸杞产量,但极易产生NH₃、N₂O等气体,从而降低氮肥利用率^[16]。因此,探究合理的施氮措施,降低柴达木枸杞园土壤NH₃挥发和N₂O排放刻不容缓。目前研究施氮对NH₃挥发和N₂O排放影响的相关研究主要集中于梨、苹果等^[8,17],而对柴达木枸杞的研究鲜有报道。本试验通过设置不同施氮量及配施硝化抑制剂,研究其对柴达木枸杞园土壤NH₃挥发和N₂O排放的影响,旨在为枸杞生产提高氮肥利用率及降低环境污染提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2019年及2020年在青海省海西州诺木洪农场(96°20'E, 36°25'N)进行。该地区属高原大陆性气候,海拔2 760 m,年平均降雨量58 mm,试验期间两年的降水总量分别为48.32 mm和28.65 mm,平均气温分别为14.43 °C和17.52 °C(图1)。试验地土壤类型为灰棕漠土,质地为砂壤土。0~20 cm土层土壤基础理化性质:有机质含量19.51 g·kg⁻¹,全氮含量1.43 g·kg⁻¹,全磷(P₂O₅)含量3.05 g·kg⁻¹,全钾(K₂O)含量23.13 g·kg⁻¹,碱解氮含量69.76 mg·kg⁻¹,速效磷(P₂O₅)含量82.56 mg·kg⁻¹,速效钾(K₂O)含量210.80 mg·kg⁻¹,pH 8.49。0~20 cm土层土壤容重为1.51 g·cm⁻³,以上均为试验前测定结果。

1.2 试验材料

供试枸杞为树龄10 a的宁杞1号;氮肥为尿素(N 46%,云天化集团),磷肥为重过磷酸钙(P₂O₅ 46%,云天化集团),商品有机肥(有机质≥45%, N+P₂O₅+K₂O≥5%,青海恩泽农业技术有限公司);硝化抑制剂为2-氯-6(三氯甲基)-吡啶(nitrapyrin,有效成分70%,可湿性粉剂,浙江奥复托化工有限公司)。

1.3 试验设计

田间试验采用随机区组设计,枸杞种植株距为1.5 m、行距为2 m,各小区面积39 m²,共设置9个处理,每个处理3次重复。N₆₆₇(农民习惯施氮量)、N₅₃₄、N₄₀₀、N₂₆₇、N₁₃₃、N₀处理依次施用纯氮667、534、400、267、133、0 kg·hm⁻²,N₄₀₀I_{2.00}、N₂₆₇I_{1.33}、N₁₃₃I_{0.67}处理是在N₄₀₀、N₂₆₇、N₁₃₃处理施氮量的基础上,配施nitrapyrin 2.00、1.33、0.67 kg·hm⁻²。所有处理均施用商品有机

肥1 667 kg·hm⁻²,P₂O₅ 333 kg·hm⁻²,均为当地农民习惯施肥用量。

2019年5月20日及2020年5月14日在每株枸杞树的树冠下行间距主根30 cm处挖深20 cm、长50 cm、宽25 cm的施肥坑,均匀撒施有机肥及磷肥,尿素和nitrapyrin分别于2019年5月20日、6月30日及2020年5月15日、7月5日作为基肥和追肥两次施用(基肥与追肥的比例为1:1)。每次施肥前将各处理每株树的尿素和nitrapyrin提前称于同一塑料袋,混合均匀后撒施入施肥坑。灌溉等其他田间管理与当地农民习惯一致。

1.4 样品采集与测定

1.4.1 氨气

NH₃挥发收集装置如图2所示。该装置由聚氯乙烯硬质塑料管制成,内径15 cm,高10 cm。NH₃收集前在各处理小区随机选取3株长势均一的枸杞树,距树主根30 cm处将塑料管楔入土壤(约1 cm)。NH₃的捕获在施肥当日开始,下午15:00将2块厚度均为2 cm、直径为15 cm的海绵浸泡于15 mL的磷酸甘油溶液(50 mL磷酸+40 mL丙三醇,定容至1 L),充分吸收后放置于收集装置内。下层的海绵距管底5 cm,上层海绵与管顶部相平。24 h后将通气装置下层海绵于

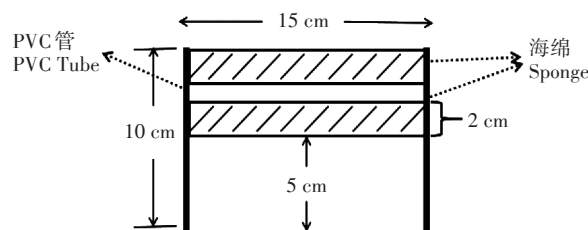


图2 NH₃挥发收集装置图

Figure 2 Diagram of NH₃ volatilization collection device

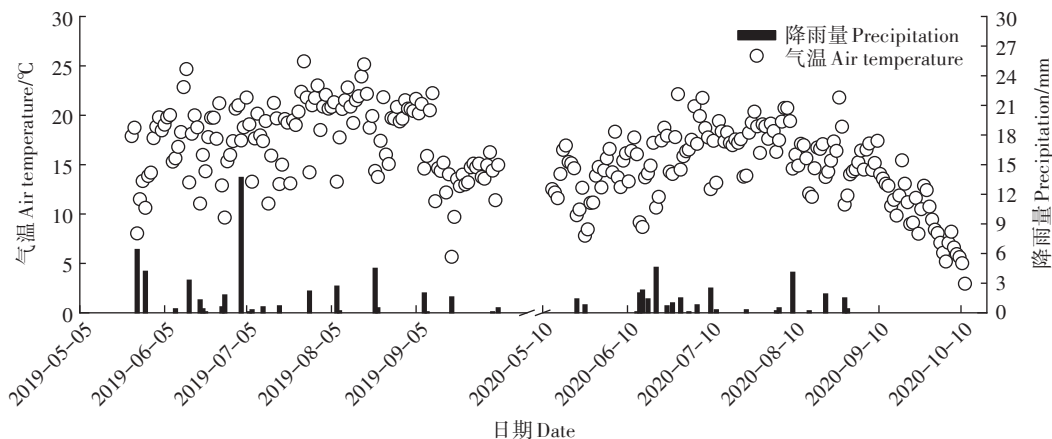


图1 监测期间的气温和降雨量

Figure 1 The air temperature and precipitation during the monitoring period

次日15:00取出,迅速装入自封袋密封,上层的海绵视其干湿情况3~7 d更换1次。将装有海绵的自封袋带回试验室,分别装入500 mL的塑料瓶中,加入300 mL 1.0 mol·L⁻¹的KCl溶液浸泡,振荡1 h后(160 r·min⁻¹)过滤,采用连续流动分析仪(Seal AA3)测定浸提液中的NH₄⁺及NO₃⁻含量。NH₃挥发收集频率为:施肥后连续7 d,灌水后连续3 d,日降雨量>20 mm时加测1次,其余时间为每周2次。

土壤NH₃挥发速率的计算公式为:

$$F(\text{NH}_3) = \frac{M}{A \times D} \times 10^{-2}$$

式中: $F(\text{NH}_3)$ 为NH₃挥发速率,kg·hm⁻²·d⁻¹;M为通气法单个装置平均每次测得的氨量(NH₃-N),mg;A为捕获装置的横截面积,m²;D为每次连续捕获的时间,d。

NH₃挥发累积量及N₂O累积量的计算均采用线性插值法^[18]。

NH₃挥发净损失率=(施氮处理NH₃挥发累积量-不施氮处理NH₃挥发累积量)/施氮量×100%^[19]。

1.4.2 氧化亚氮

N₂O收集采用静态暗箱法。样品采集前将采样装置的底座楔入土壤。采样箱(长50 cm×宽50 cm×高50 cm)由不锈钢板焊接制成,箱体外部包有泡沫板以防止箱内温度有剧烈变化。在箱体一侧距底部约35 cm处接三通阀,其旁设有温度探测口,箱内顶部对角处安装小型风扇。采样在上午9:00—12:00进行,采气前将底座的外围凹槽(宽度2 cm)注满水以密封箱体,再将箱体紧扣于底座。在关箱后的第0、15、30、45 min分别用50 mL注射器抽取箱内气体,注入密封气袋后用气相色谱仪(安捷伦GC7890)测定气体样品中N₂O浓度。采样时间为2019年5—10月及2020年5—10月。采样频率为施肥后连续7 d,灌水后连续3 d,日降水量>20 mm时加测1次,其余时间为每周采集1次。

N₂O的排放通量计算公式为:

$$F(\text{N}_2\text{O}) = 2 \times \frac{14}{22.4} \times h \times \frac{d_c}{d_i} \times \frac{273}{273 + T}$$

式中: $F(\text{N}_2\text{O})$ 为N₂O排放通量,μg·m⁻²·h⁻¹;2为N₂O中氮原子的个数;14为氮原子的摩尔质量,g·mol⁻¹;22.4为标准状态下气体的摩尔体积,L·mol⁻¹;h为箱体高度,m; d_c/d_i 为采样过程中箱内N₂O浓度随时间的变化率;T为采样过程中气体收集箱内的平均温度,℃。

N₂O排放净损失率=(施氮处理N₂O累积量-不施氮处理N₂O累积量)/施氮量×100%

1.4.3 枸杞产量

2019年7月30日、8月20日、9月14日及2020年8月5日、8月27日、9月19日在各处理小区随机选取3株长势均一的枸杞树,分别采摘全部果实,晾干后测定枸杞干果质量。

枸杞净收益(元·hm⁻²)=枸杞产量(kg·hm⁻²)×[枸杞单价(40元·kg⁻¹)-人工采果费(4.5元·kg⁻¹)]-[尿素单价(1.98元·kg⁻¹)×施用量(kg·hm⁻²)+重过磷酸钙单价(2.2元·kg⁻¹)×施用量(kg·hm⁻²)+商品有机肥单价(1.2元·kg⁻¹)×施用量(kg·hm⁻²)+nitrapyrin单价(160元·kg⁻¹)×施用量(kg·hm⁻²)]

1.4.4 土壤温度与土壤湿度

在采集NH₃及N₂O样品时用地温计测定10 cm土壤温度,并用烘干法测定0~10 cm土壤含水量,土壤容重采用环刀法^[20]测定。

土壤充水孔隙率(WFPS)=土壤质量含水量×土壤容重/(1-土壤容重/2.65)^[18]

1.5 数据处理

采用Excel及Origin 8.0软件进行数据处理并做图,采用SPSS 25.0软件进行方差分析和显著性检验,并分析NH₃挥发和N₂O排放通量分别与WFPS及10 cm土壤温度的相关性。

2 结果与分析

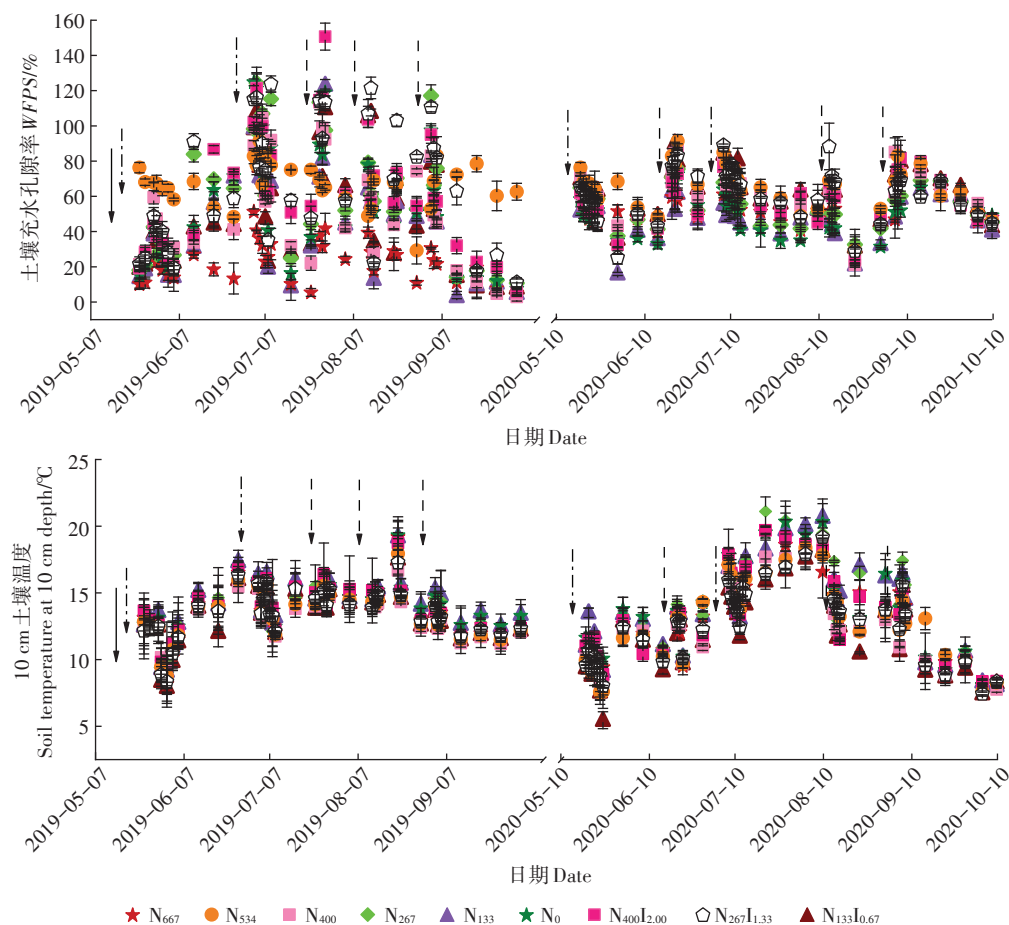
2.1 土壤充水孔隙率与土壤温度

每次灌水后WFPS先达到峰值后逐渐降低(图3)。由于2019年7月3日和2020年6月21日的降雨并结合灌水,两年WFPS均在第二次灌水后达到峰值。2019年平均WFPS 58.32%与2020年的58.29%基本相同。10 cm土温随灌水的发生先降低后增加,2019和2020年的10 cm土温均在8月份达到最高,最高温度分别为19.51℃和21.70℃,最低温度分别为8.10℃和5.63℃。两年土壤温度均值分别为13.72℃和12.92℃。

2.2 不同施氮措施对NH₃挥发的影响

2.2.1 NH₃挥发速率

每次施肥后NH₃挥发速率均升高,随后逐渐降低并趋于平缓。NH₃挥发速率在施肥后的3~8 d出现峰值,灌水后的1~3 d呈下降趋势(图4)。氮肥的施用显著提高了枸杞园土壤的NH₃挥发速率,硝化抑制剂对NH₃挥发速率无显著影响。N₆₆₇处理的NH₃挥发速率最高,N₀处理最低。2019年N₆₆₇处理的NH₃挥发速率在施基肥后的第8 d(5月28日)和追肥后的



实线箭头和虚线箭头分别表示施肥和灌水日期;点线箭头表示施肥且灌水的日期。下同
Solid and dash arrows represent fertilization and irrigation dates, respectively; Dash dot arrows indicate fertilizer date combined with irrigation. The same below

图3 试验期间土壤充水孔隙率(WFPS)和10 cm土壤温度

Figure 3 Soil water-filled pore space(WFPS) and 10 cm soil temperature during study period

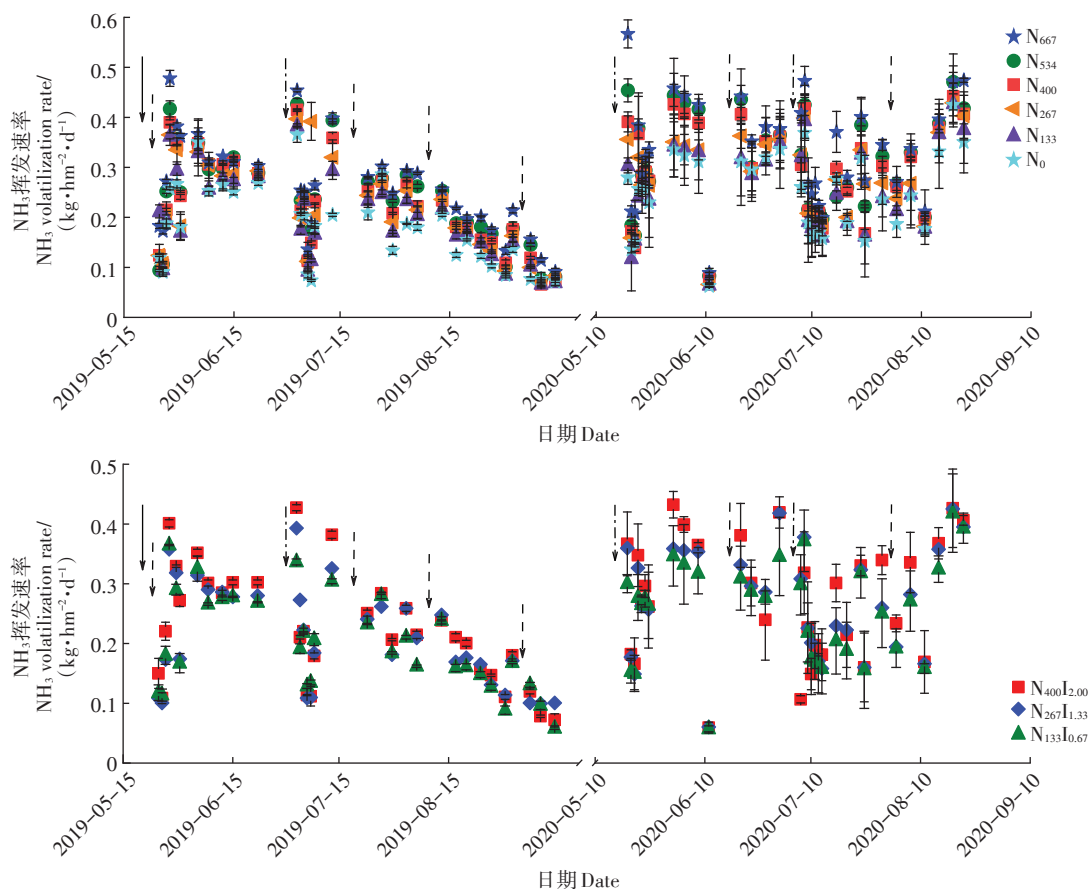
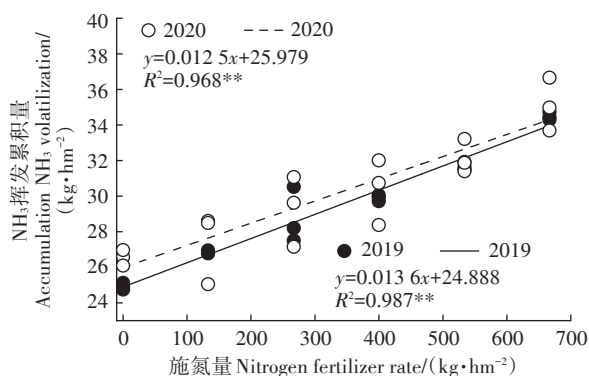
第3 d(7月3日)达到峰值,分别为 $0.48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; N_{667} 处理的 NH_3 挥发速率较 N_{534} 、 N_{400} 、 N_0 处理显著提高了10.64%、16.59%、49.43%,较 $N_{400I2.00}$ 、 $N_{267I1.33}$ 处理增加了14.04%、20.07%。2020年 NH_3 挥发速率在施基肥后的第5 d(5月20日)和追肥后的第4 d(7月9日)出现峰值,分别为 $0.57 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.47 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; N_{667} 处理的 NH_3 挥发速率为 $0.34 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,较 N_{400} 、 N_{267} 处理增加了14.92%、21.94%,较 $N_{400I2.00}$ 、 $N_{267I1.33}$ 处理增加了21.07%和24.63%。 $N_{400I2.00}$ 、 $N_{267I1.33}$ 、 $N_{133I0.67}$ 处理的 NH_3 挥发速率与对应的 N_{400} 、 N_{267} 、 N_{133} 处理间无明显差异。土壤温度和WFPS均在一定程度上影响了枸杞园土壤的 NH_3 挥发。土壤温度与 NH_3 挥发速率呈显著正相关($P < 0.05$),WFPS与 NH_3 挥发呈负相关(表1)。

2.2.2 NH_3 挥发累积量

NH_3 挥发累积量与施氮量呈极显著正相关,两年

的相关系数分别为0.987和0.968(图5)。配施硝化抑制剂对 NH_3 挥发累积量及净损失量无显著影响。 N_{667} 处理的 NH_3 挥发累积量显著高于其他处理(表2)。2019年各处理 NH_3 挥发累积量为 $24.91 \sim 34.49 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N_{667} 处理的 NH_3 挥发累积量较 N_{534} 和 N_{400} 处理显著增加了8.87%、15.31%, $N_{400I2.00}$ 和 $N_{267I1.33}$ 处理较 N_{667} 处理 NH_3 挥发累积量显著降低了13.22%、16.64%。2020年 NH_3 挥发累积量为 $26.54 \sim 35.11 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N_{667} 处理的 NH_3 挥发累积量较 N_{534} 、 N_{400} 处理及 $N_{400I2.00}$ 、 $N_{267I1.33}$ 处理显著增加了9.17%、15.61%和17.98%、22.12%。

NH_3 挥发净损失量随施氮量的增加而增加,两年 N_{667} 处理的 NH_3 挥发净损失量均为最高,较 N_{534} 、 N_{400} 处理显著增加了2.81、4.58 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和2.95、4.74 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,较 $N_{400I2.00}$ 处理显著增加了4.56 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和5.35 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。两年中硝化抑制剂对 NH_3 挥发净损失量均无显著影响。

图4 枸杞生育期的NH₃挥发速率Figure 4 NH₃ volatilization rate during wolfberry growing season图5 施氮量与NH₃挥发累积量的关系Figure 5 The relationship between nitrogen fertilizer rate and accumulation NH₃ volatilization

2.3 不同施氮措施对N₂O排放的影响

2.3.1 N₂O排放通量

每次施肥和灌水后N₂O排放通量均升高,且在施肥后的3~4 d达到峰值,灌水后的1~3 d显著增加,随后降低并趋于平缓(图6)。N₆₆₇处理的N₂O排放通量最高,排放峰值均出现在基肥施用后的第4 d(2019年5月24日及2020年5月19日),分别为1 765.43

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 和1 783.27 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;2019年和2020年试验期间N₆₆₇处理的N₂O日均排放通量分别为330.85、496.59 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,分别较N₄₀₀、N₂₆₇、N₀处理增加了42.21%、89.46%、636.86%和23.64%、54.51%、979.07%,较N_{400I2.00}、N_{267I1.33}处理分别增加了123.80%、131.17%和91.59%、129.97%。硝化抑制剂的添加显著降低了N₂O的排放通量。2019年和2020年试验期间,N_{400I2.00}处理的排放峰值分别为1 242.57 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 和1 252.75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,日均排放通量分别为147.83、259.20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,较N₄₀₀处理分别降低了36.46%、35.47%。

N₂O排放与土壤温度、WFPS均呈显著正相关($P<0.05$)(表1)。2019年和2020年试验期间,N₆₆₇处理的N₂O排放与WFPS均呈极显著正相关,相关系数分别为0.599、0.617($P<0.01$),N_{400I2.00}处理的N₂O排放与WFPS呈显著正相关,相关系数分别为0.334和0.456。

2.3.2 N₂O累积排放量

N₂O累积排放量与施氮量呈极显著正相关,2019年和2020年的相关系数分别为0.984和0.923(图7)。

表1 土壤充水孔隙率(WFPS)和土壤温度与NH₃挥发和N₂O排放的相关性分析Table 1 The relationship between WFPS and soil temperature and NH₃ emission, N₂O flux

排放物 Emission	处理 Treatment	土壤充水孔隙率 WFPS		土壤温度 T_{soil}	
		2019	2020	2019	2020
NH ₃	N ₆₆₇	-0.058	-0.080	0.586*	0.464*
	N ₅₃₄	-0.029	-0.148	0.426*	0.504*
	N ₄₀₀	-0.086	-0.185	0.422*	0.675**
	N ₂₆₇	-0.143	-0.058	0.476*	0.435*
	N ₁₃₃	-0.040	-0.370	0.468*	0.423*
	N ₀	-0.040	-0.015	0.242	0.282
	N ₄₀₀ I _{2.00}	-0.028	-0.086	0.384*	0.574*
	N ₂₆₇ I _{1.33}	-0.197	-0.126	0.405*	0.451*
	N ₁₃₃ I _{0.67}	-0.126	-0.258	0.364	0.405*
	N ₆₆₇	0.599**	0.617**	0.476*	0.512*
N ₂ O	N ₅₃₄	0.414*	0.451*	0.349*	0.492*
	N ₄₀₀	0.462*	0.408*	0.467*	0.603*
	N ₂₆₇	0.458*	0.467*	0.503*	0.473*
	N ₁₃₃	0.297*	0.208*	0.425*	0.507*
	N ₀	0.251*	0.093	0.246	0.367*
	N ₄₀₀ I _{2.00}	0.334*	0.456**	0.534*	0.493*
	N ₂₆₇ I _{1.33}	0.118	0.299*	0.458*	0.446*
	N ₁₃₃ I _{0.67}	0.348*	0.303*	0.439*	0.399*

注: *和**表示在0.05和0.01水平下显著相关。

Note: * and ** indicate correlation is significant at the level of 0.05 and 0.01, respectively.

硝化抑制剂的添加显著降低了枸杞园 N₂O 累积排放量及净损失量(表3)。2019年和2020年 N₆₆₇ 处理的 N₂O 累积排放量均最高,分别为 6.84 kg·hm⁻² 和 9.73 kg·hm⁻²; N₀ 处理最低,分别为 0.91 kg·hm⁻² 和 1.19 kg·hm⁻²。2019年 N₆₆₇ 处理 N₂O 累积排放量较 N₅₃₄、N₄₀₀ 处理显著增加了 24.36%、43.10%, N₂O 净损失量显著增加了 29.19%、53.23%。N₄₀₀I_{2.00}、N₂₆₇I_{1.33}、N₁₃₃I_{0.67} 处理的 N₂O 累积排放量分别较 N₄₀₀、N₂₆₇、N₁₃₃ 处理显著降低了 34.31%、31.45%、41.37%, N₂O 净损失量显著降低了 42.38%、41.64%、65.19%。2020年 N₆₆₇ 处理 N₂O 累积排放量较 N₅₃₄、N₄₀₀ 处理显著增加了 7.51%、16.11%, 净损失量显著增加了 8.65%、18.78%。与 N₄₀₀、N₂₆₇、N₁₃₃ 处理相比, N₄₀₀I_{2.00}、N₂₆₇I_{1.33}、N₁₃₃I_{0.67} 处理的 N₂O 累积排放量显著降低了 28.52%、29.90%、33.84%, N₂O 净损失量显著降低了 33.24%、36.98%、45.51%。

2.4 不同施氮措施对枸杞产量及效益的影响

随施氮量的增加枸杞产量及净收益呈先增加后降低的趋势(表4)。2019年 N₅₃₄ 处理的枸杞产量较 N₆₆₇ 处理显著增加了 7.56%, 净收益显著提高了 7.95%

表2 枸杞园 NH₃ 挥发累积量Table 2 Cumulative loss of NH₃ in wolfberry orchard

年份 Year	处理 Treatment	氨挥发累积量 Accumulation NH ₃ volatilization/(kg·hm ⁻²)	净损失量 Net loss/ (kg·hm ⁻²)	损失率 Loss rate/%
2019	N ₆₆₇	34.49±0.22a	9.58±0.03a	1.44±0.01ab
	N ₅₃₄	31.68±0.22b	6.77±0.03b	1.27±0.01b
	N ₄₀₀	29.91±0.17c	5.00±0.02c	1.25±0.01b
	N ₂₆₇	28.74±1.58c	3.83±1.39d	1.43±0.52ab
	N ₁₃₃	26.84±0.89d	1.93±0.70e	1.45±0.53ab
	N ₀	24.91±0.19e		
	N ₄₀₀ I _{2.00}	29.93±0.13c	5.02±0.06c	1.26±0.02b
	N ₂₆₇ I _{1.33}	28.75±0.15c	3.84±0.04d	1.44±0.02ab
	N ₁₃₃ I _{0.67}	27.37±0.16d	2.46±0.03e	1.84±0.02a
	N ₆₆₇	35.11±1.49a	8.57±1.05a	1.28±0.16a
2020	N ₅₃₄	32.16±0.94b	5.62±0.50b	1.05±0.09a
	N ₄₀₀	30.37±1.85bc	3.83±1.41bc	0.96±0.35a
	N ₂₆₇	29.28±1.98cd	2.74±1.54cd	1.03±0.58a
	N ₁₃₃	27.38±2.03de	0.84±1.59d	0.63±1.20a
	N ₀	26.54±0.44e		
	N ₄₀₀ I _{2.00}	29.76±1.26cd	3.22±0.82c	0.81±0.05a
	N ₂₆₇ I _{1.33}	28.75±0.82cde	2.21±0.38cd	0.83±0.14a
	N ₁₃₃ I _{0.67}	27.36±0.49de	0.82±0.05d	0.62±0.04a

注: 表中数值为平均值±标准偏差; 同列数据后不同字母表示同一年份内不同处理间有显著差异(P<0.05)。下同。

Note: The values in the table are represented with mean±SD; Different letters after the same column of data indicate that there are significant differences among treatments in the same year(P<0.05). The same below.

(P<0.05)。相同施氮量下添加硝化抑制剂提高了枸杞产量及净收益。其中两年 N₄₀₀I_{2.00} 处理的枸杞产量及净收益均最高, 产量分别为 7 867 kg·hm⁻² 和 8 462 kg·hm⁻², 净收益分别为 274 504 元·hm⁻² 和 295 626 元·hm⁻², 2019年 N₄₀₀I_{2.00} 处理的枸杞产量较 N₆₆₇ 处理增加了 9.26%, 净收益提高了 9.80%; 2020年 N₄₀₀I_{2.00} 处理较 N₆₆₇、N₄₀₀ 处理枸杞产量分别增加了 6.67%、5.62%, 净收益分别提高了 7.10%、5.59%。

由肥料效应方程(图8)可知, 2019年施氮量为 445 kg·hm⁻² 时枸杞产量最高, 为 7 583 kg·hm⁻²; 施氮量为 441 kg·hm⁻² 时经济效益最佳, 为 264 557 元·hm⁻²。2020年施氮量为 554 kg·hm⁻² 时枸杞产量最高, 为 8 055 kg·hm⁻²; 施氮量为 545 kg·hm⁻² 时经济效益最佳, 为 280 891 元·hm⁻²。

3 讨论

3.1 氮肥减施及添加硝化抑制剂对产量的影响

相关研究表明, 作物产量随施氮量的增加呈先增

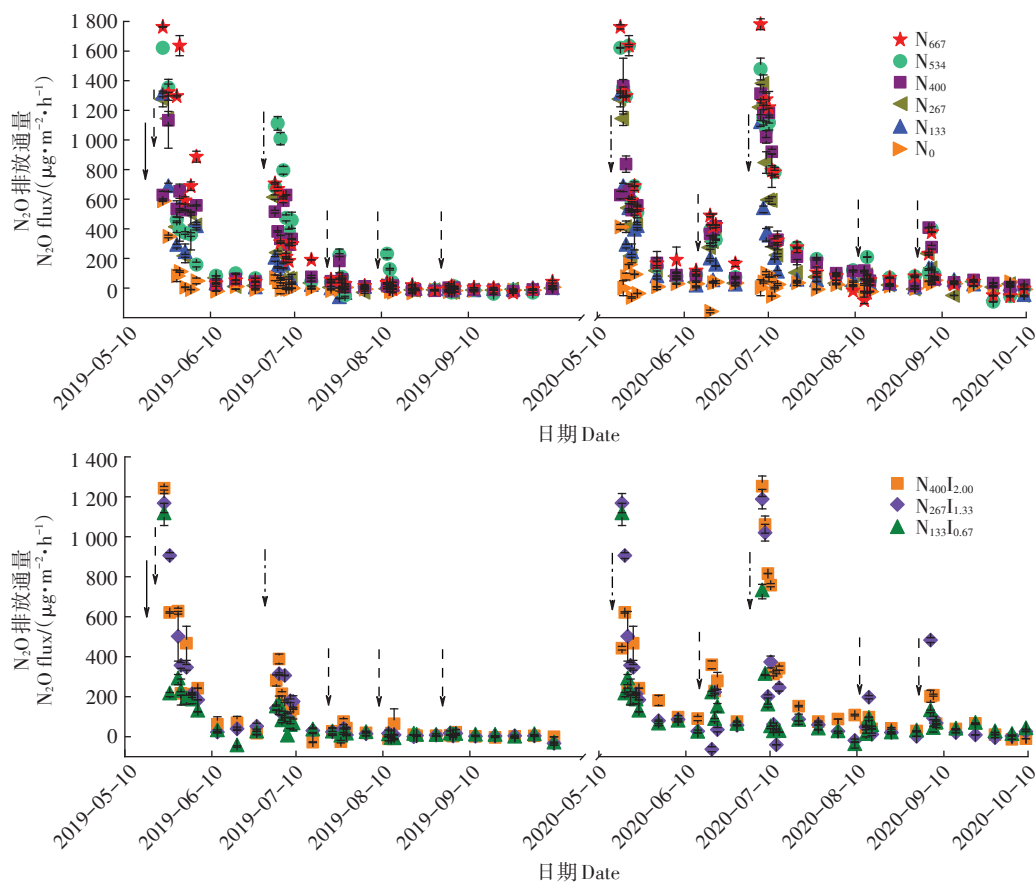
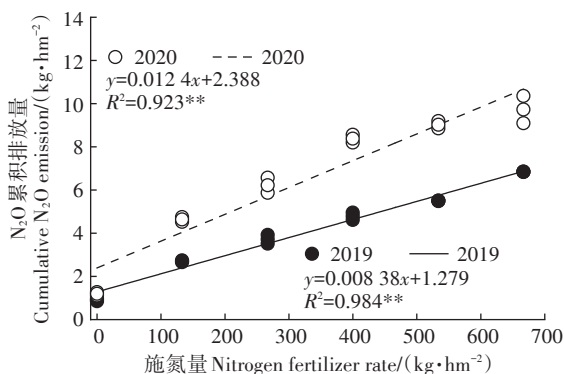
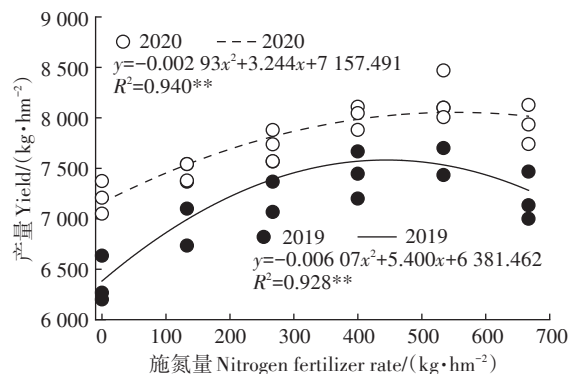
图6 枸杞生育期的N₂O排放通量Figure 6 N₂O emissions during wolfberry growing season图7 施氮量与N₂O累积排放量的关系Figure 7 The relationship between nitrogen fertilizer rate and cumulative N₂O emission

图8 施氮量与产量的关系

Figure 8 The relationship between nitrogen fertilizer rate and yield

加后降低的趋势^[21]。本试验结果也发现,施氮量为0~667 kg·hm⁻²时,枸杞产量呈先增后降的趋势,且根据肥料效应方程,2019年及2020年施氮量分别为445 kg·hm⁻²和554 kg·hm⁻²时,枸杞产量最高,施氮量为441 kg·hm⁻²和545 kg·hm⁻²时,枸杞经济效益最佳。农民习惯施氮量为667 kg·hm⁻²,均显著高于最佳产量施氮量及最佳经济效益施氮量。过量施氮降低了

枸杞产量,可能是由于氮素与多种元素有协同和拮抗作用,过量的氮素可能阻碍了树体对其他营养元素的吸收和利用,且前人研究表明,土壤长期处于高氮水平会降低土壤pH值^[22],影响根系活力,直接导致根系吸收养分能力下降。本研究表明,施氮量为400 kg·hm⁻²配施2.00 kg·hm⁻² nitrapyrin的枸杞产量显著高于农民习惯施氮量。原因可能是nitrapyrin可抑制土壤

表3 枸杞园 N₂O 累积排放量
Table 3 Cumulative N₂O emission in wolfberry orchard

年份 Year	处理 Treatment	N ₂ O 累积排放量 N ₂ O cumulative emission/(kg·hm ⁻²)	净损失量 Net loss/ (kg·hm ⁻²)	损失率 Loss rate/%
2019	N ₆₆₇	6.84±0.01a	5.93±0.05a	0.89±0.01d
	N ₅₃₄	5.50±0.01b	4.59±0.05b	0.86±0.01d
	N ₄₀₀	4.78±0.17c	3.87±0.11c	0.97±0.03c
	N ₂₆₇	3.72±0.20d	2.81±0.14d	1.05±0.05b
	N ₁₃₃	2.49±0.04f	1.58±0.02f	1.19±0.02a
	N ₀	0.91±0.06h		
	N ₄₀₀ I _{2.00}	3.14±0.09e	2.23±0.03e	0.56±0.01f
	N ₂₆₇ I _{1.33}	2.55±0.11f	1.64±0.05f	0.61±0.02e
	N ₁₃₃ I _{0.67}	1.46±0.03g	0.55±0.03g	0.41±0.02g
2020	N ₆₆₇	9.73±0.63a	8.54±0.55a	1.28±0.08e
	N ₅₃₄	9.05±0.17b	7.86±0.09b	1.47±0.02d
	N ₄₀₀	8.38±0.18c	7.19±0.10c	1.79±0.03c
	N ₂₆₇	6.22±0.35d	5.03±0.27d	1.88±0.10b
	N ₁₃₃	4.64±0.11e	3.45±0.03e	2.59±0.02a
	N ₀	1.19±0.08g		
	N ₄₀₀ I _{2.00}	5.99±0.19d	4.80±0.11d	1.20±0.03ef
	N ₂₆₇ I _{1.33}	4.36±0.14e	3.17±0.06e	1.18±0.02f
	N ₁₃₃ I _{0.67}	3.07±0.09f	1.88±0.01f	1.41±0.01d

表4 不同氮肥处理的枸杞产量及经济效益
Table 4 Wolfberry yield and economic benefit

年份 Year	处理 Treatment	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	净收益/(元·hm ⁻²) Net income/(yuan·hm ⁻²)
2019	N ₆₆₇	7 200±240c	249 997
	N ₅₃₄	7 744±336ab	269 883
	N ₄₀₀	7 437±233abc	259 559
	N ₂₆₇	7 333±252bc	256 442
	N ₁₃₃	7 067±318c	247 573
	N ₀	6 367±233d	223 297
	N ₄₀₀ I _{2.00}	7 867±167a	274 504
	N ₂₆₇ I _{1.33}	7 700±153ab	269 257
	N ₁₃₃ I _{0.67}	7 033±252c	246 286
2020	N ₆₆₇	7 933±294bc	276 019
	N ₅₃₄	8 191±244ab	285 752
	N ₄₀₀	8 012±118bc	279 971
	N ₂₆₇	7 729±138cd	270 500
	N ₁₃₃	7 487±94de	262 483
	N ₀	7 210±161e	253 223
	N ₄₀₀ I _{2.00}	8 462±107a	295 626
	N ₂₆₇ I _{1.33}	8 079±145bc	282 712
	N ₁₃₃ I _{0.67}	7 584±131d	265 846

中氮素的硝化作用,降低 NO₃-N 淋溶损失和硝化-反硝化损失,提高了氮素利用率及枸杞产量^[23],与段颜静^[24]的研究结果相似。因此,在农民习惯施氮量的基

础上减施 40% 氮肥且配施 nitrapyrin,可满足枸杞全生育期对氮素的需求,并有显著的增产效果,且可达到较优经济效益。

3.2 氮肥减施及添加硝化抑制剂对 NH₃ 挥发的影响

本试验结果表明,氮肥减施显著降低了枸杞园土壤的 NH₃ 挥发速率及累积量。原因在于化学氮肥施入土壤后,尿素在脲酶的作用下水解为 NH₄HCO₃,随后迅速转化为 NH₄⁺-N,为 NH₃ 挥发提供了充足的底物。相关分析表明,NH₃ 挥发与土壤温度呈正相关,与土壤水分呈负相关。可能是由于土壤灌水提高了土壤含水量,而高含水量会抑制土壤脲酶活性,影响 NH₄⁺ 转化为 NH₃,同时灌水促使尿素向土壤深层淋溶,降低了土壤表层 NH₄⁺ 含量,进而减少了 NH₃ 挥发^[25]。本试验 NH₃ 挥发损失率为 0.62%~1.84%。针对苹果园的研究结果表明,施氮量为 0~225 kg·hm⁻² 时, NH₃ 挥发损失率为 5.71%~10.81%^[26]。与前人研究相比,本试验的 NH₃ 挥发损失率偏低,可能是由于苹果园试验期间未进行人工灌溉,土壤水分主要来源于大气降水,且当地降雨量较低;而本试验枸杞生育期内灌水 5 次,土壤含水量较高。NH₃ 挥发速率与土壤含水量呈负相关,使得本研究的 NH₃ 挥发损失较低。添加硝化抑制剂对 NH₃ 挥发的影响研究结果不一。廖欢等^[11]、阿力木等^[27]的研究表明,添加硝化抑制剂促进了 NH₃ 挥发;也有研究表明,添加 nitrapyrin 能降低 NH₃ 挥发^[28]。本试验结果表明硝化抑制剂对 NH₃ 挥发无显著影响。可能的原因是硝化抑制剂可抑制 NH₄⁺-N 转化为 NO₃⁻-N,从而增加了土壤表层 NH₄⁺-N 的含量,促进了 NH₃ 挥发,同时枸杞园在枸杞生育期内进行多次灌溉,致使土壤表层的氮素向深层转移,两者共同作用可能导致硝化抑制剂的添加对 NH₃ 挥发无显著影响。因此,试验地的环境条件可能导致硝化抑制剂对 NH₃ 挥发无显著影响,这与 WOLF 等^[29]的研究结果相似。本试验土壤温度与 NH₃ 挥发速率呈显著正相关,主要是在适宜的土壤温度范围内,温度升高可提高土壤脲酶活性,加快尿素水解为 NH₄⁺-N,也会减弱土壤胶体对 NH₄⁺ 的吸附能力,增加土壤中 NH₄⁺ 含量,从而提高氨挥发速率^[30]。

3.3 氮肥减施及添加硝化抑制剂对 N₂O 排放的影响

本试验表明,施氮量与 N₂O 排放呈极显著正相关,与 CHENG 等^[31]结果相似。这是由于化学氮肥为硝化细菌提供底物,进而促进了 N₂O 排放。研究表明高氮施用量会显著增加氮肥的气态损失,降低枸杞对氮肥的利用率。土壤水分、土壤温度和 N₂O 排放呈显

著正相关。本研究结果显示,每次灌溉后N₂O排放均升高。灌溉后土壤水分达到饱和甚至淹水,形成嫌气环境,从而降低了土壤的氧化还原电位,促进了反硝化作用及N₂O排放^[32]。同时本试验两年WFPS均值分别为58.32%和58.29%,前人研究表明当WFPS小于60%时,土壤硝化微生物活性随水分增加而增强^[33],说明试验地的水分条件促进了N₂O的排放;土壤温度的升高提高了土壤硝化及反硝化微生物的活性,加快土壤硝化及反硝化作用,促进了N₂O排放。本研究施氮量为0~667 kg·hm⁻²,N₂O日均排放速率为6.55~67.57 g·hm⁻² d⁻¹,在同等施氮水平下,较XIE等^[34]在苹果园(N₂O日平均排放速率为71.78 g·hm⁻²)的研究结果偏低,可能是由于本试验地位于青藏高原,温度和湿度较低,一定程度上抑制了土壤微生物的活性,进而减少了N₂O的排放。本试验结果显示,硝化抑制剂显著降低了N₂O排放及损失率,这与陈浩等^[35]研究发现添加nitrapiyrin后N₂O累积排放量降低的结果类似。nitrapiyrin抑制了NH₄⁺向NO₂⁻转化,进而抑制了整个硝化过程,降低了N₂O排放^[36]。因此,通过调节试验地的土壤温度和土壤湿度也可降低土壤氮素的气态损失。

4 结论

(1)随着氮肥用量的增加,枸杞产量及收益均呈先增加后降低的趋势;相同施氮量下添加硝化抑制剂处理的枸杞产量及收益无显著变化,但较农民习惯施肥处理显著提高。

(2)氮肥用量的提高显著增加了NH₃挥发累积量和N₂O累积排放量;添加0.5%的nitrapiyrin与农民习惯施氮量相比,显著降低了NH₃挥发和N₂O排放。

(3)综合经济效益和生态效益,推荐施氮量400 kg·hm⁻²且配施nitrapiyrin 2.00 kg·hm⁻²为柴达木高肥力枸杞园较优的施氮组合。

参考文献:

- [1] 刘淑兰. 2008—2009年中国氮肥生产与市场分析[J]. 中国石油和化工经济分析, 2009(6): 26—29. LIU S L. China's nitrogen fertilizer production and market analysis from 2008 to 2009[J]. *Economic Analysis of China's Petroleum and Chemical Industry*, 2009(6): 26—29.
- [2] 詹风, 刘雪琴, 孟涛, 等. 氮素对农田生态系统的污染现状及对策[J]. 陕西农业科学, 2006(1): 45—46, 65. ZHAN F, LIU X Q, MENG T, et al. Current status and countermeasures of nitrogen pollution to farmland ecosystem[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2006(1): 45—46, 65.
- [3] 张卫峰, 马林, 黄高强, 等. 中国氮肥发展、贡献和挑战[J]. 中国农业

- 科学, 2013, 46(15): 3161—3171. ZHANG W F, MA L, HUANG G Q, et al. The development and contribution of nitrogenous fertilizer in China and challenges faced by the country[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(15): 3161—3171.
- [4] 郭广正, 张芬, 沈远鹏, 等. 减氮配施硝化抑制剂对大白菜农学和环境效应评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2307—2315. GUO G Z, ZHANG F, SHEN Y P, et al. Comprehensive assessment of the agronomic and environmental effects of N application rate reduction combined with nitrification inhibitor on Chinese cabbage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2307—2315.
- [5] 臧祎娜, 周晓丽, 解东友, 等. 硝化抑制剂DCD和NP对温室菜田土壤氮素转化及N₂O、CO₂排放的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(20): 333—337. ZANG Y N, ZHOU X L, XIE D Y, et al. Effects of nitrification inhibitors DCD and NP on soil nitrogen transformation and N₂O and CO₂ emissions in greenhouse vegetable fields[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(20): 333—337.
- [6] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778—783. ZHU Z L. Research on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778—783.
- [7] 郑蕾, 王学东, 郭李萍, 等. 施肥对露地菜地氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4063—4070. ZHENG L, WANG X D, GUO L P, et al. Impact of fertilization on ammonia volatilization and N₂O emissions in an open vegetable field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 4063—4070.
- [8] 王成, 陈波浪, 玉素甫江·玉素音, 等. 施氮量对库尔勒香梨园氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 157—164. WANG C, CHEN B L, YUSUPUJIANG Y S Y, et al. Effects of nitrogen application rate on ammonia volatilization and nitrous oxide emission in Korla fragrant pear orchard[J]. *Agricultural Research in Arid Area*, 2019, 37(5): 157—164.
- [9] 朱志军. 渭北苹果园施肥制度对氨挥发和温室气体排放的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019. ZHU Z J. Effects of fertilization system on ammonia volatilization and greenhouse gas emission in Weibei apple orchard[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.
- [10] 张俊华. 尿素用量及抑制剂施用对植蕉土壤N₂O、NO排放和香蕉碳氮分配的影响[D]. 海口: 海南大学, 2012. ZHANG J H. Effects of urea dose and inhibitors application on N₂O, NO emissions from soils with banana planted and C, N distribution of banana plants[D]. Haikou: Hainan University, 2012.
- [11] 廖欢, 王方斌, 刘凯, 等. 不同施氮措施配合硝化抑制剂对滴灌棉田土壤NH₃挥发和N₂O排放的影响[J]. 西北农业学报, 2020, 29(9): 1378—1388. LIAO H, WANG F B, LIU K, et al. Effects of nitrogen application combined with nitrification inhibitors on NH₃ volatilization and N₂O emission in drip-irrigated cotton field[J]. *Acta Agriculturae Borealioccidentalis Sinica*, 2020, 29(9): 1378—1388.
- [12] 赵斌, 朱四喜, 程谊, 等. 贵州草海地区不同土地利用方式土壤中尿素氮转化对3种硝化抑制剂的响应[J]. 西北农业学报, 2019, 28(7): 1169—1178. ZHAO B, ZHU S X, CHENG Y, et al. Response of soil urea nitrogen conversion to three nitrification inhibitors of different land use patterns in Caohai area, Guizhou Province[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2019, 28(7): 1169—1178.
- [13] 王发科, 都占良, 雷玉红, 等. 柴达木盆地南缘农业气候资源变化

- 特征分析[J]. 中国农学通报, 2019, 35(23): 91–96. WANG F K, DU Z L, LEI Y H, et al. Agricultural climate resources show change features in the south edge of the Qaidam Basin[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(23): 91–96.
- [14] 朱生桂. 青海高原枸杞品种特点及栽培对策[J]. 绿色科技, 2020(7): 168–170. ZHU S G. Characteristics and cultivation strategies of main lycium varieties in Qinghai Plateau[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2020(7): 168–170.
- [15] 罗旭鹏. 青海省枸杞产业发展现状与优势分析[J]. 青海农林科技, 2019(4): 42–45, 81. LUO X P. Advancement, current status and advantages of wolfberry industry in Qinghai Province[J]. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, 2019(4): 42–45, 81.
- [16] 吴凡, 张克强, 谢坤, 等. 洱海流域典型农区不同施肥处理下稻田氨挥发变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1735–1742. WU F, ZHANG K Q, XIE K, et al. Characteristics of ammonia volatilization from rice paddy fields under different fertilization treatments in typical agricultural areas of Erhai basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1735–1742.
- [17] 葛顺峰, 姜远茂, 魏绍冲, 等. 不同供氮水平下幼龄苹果园氮素去向初探[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 949–955. GE S F, JIANG Y M, WEI S C, et al. Nitrogen balance under different nitrogen application rates in young apple orchards[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2011, 17(4): 949–955.
- [18] DING W, CAI Y, CAI Z C, et al. Nitrous oxide emissions from an intensively cultivated maize–wheat rotation soil in the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 373(2/3): 501–511.
- [19] 郑凤霞, 董树亭, 刘鹏, 等. 长期有机无机肥配施对冬小麦籽粒产量及氨挥发损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 567–577. ZHENG F X, DONG S T, LIU P, et al. Effects of combined application of manure and chemical fertilizers on ammonia volatilization loss and yield of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(3): 567–577.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 269. LU R K. Soil agrochemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 269.
- [21] DAI Z G, FEI L J, HUANG D L, et al. Coupling effects of irrigation and nitrogen levels on yield, water and nitrogen use efficiency of surge–root irrigated jujube in a semiarid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 146–154.
- [22] 蔡泽江, 孙楠, 王伯仁, 等. 长期施肥对红壤 pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 71–78. CAI Z J, SUN N, WANG B R, et al. Effects of long-term fertilization on pH, crop yield and absorption of nitrogen, phosphorus and potassium in red soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2011, 17(1): 71–78.
- [23] 顾艳, 吴良欢, 刘彦伶, 等. 氯甲基吡啶剂型对土壤硝化的抑制效果初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(2): 251–258. GU Y, WU L H, LIU Y L, et al. A preliminary study on the inhibitory effect of nitrapyrin formulations on soil nitrification[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(2): 251–258.
- [24] 段颜静. 硝化抑制剂控释尿素在苹果上的施用效果[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015. DUAN Y J. Application effect of urea controlled release by nitrification inhibitor on apples[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.
- [25] 朱铭莪. 土壤酶动力学及热力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011. ZHU M E. Soil enzyme kinetics and thermodynamics[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [26] 葛顺峰. 苹果园土壤氮素总硝化–反硝化作用和氨挥发损失研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011. GE S F. Study on gross nitrification–denitrification and ammonia volatilization losses in apple orchard[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2011.
- [27] 阿力木·阿布来提, 余冬立, 张文娟, 等. 抑制剂对淹水土壤反硝化和氨挥发的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(12): 5191–5199. ALIMU A B L T, SHE D L, ZHANG W J, et al. Effects of inhibitors on denitrification and ammonia volatilization in submerged soils[J]. *China Environment Science*, 2019, 39(12): 5191–5199.
- [28] JAIME R, ANTONIO V, JULIA L, et al. The effect of nitrification inhibitors on NH_3 and N_2O emissions in highly N fertilized irrigated Mediterranean cropping systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 427–436.
- [29] WOLF U, FU R H R, HOPPER F, et al. Contribution of N_2O and NH_3 to total greenhouse gas emission from fertilization: Results from a sandy soil fertilized with nitrate and biogas digestate with and without nitrification inhibitor[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2014, 100(1): 121–134.
- [30] 曹文超, 宋贺, 王娅静, 等. 农田土壤 N_2O 排放的关键过程及影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1781–1798. CAO W C, SONG H, WANG Y J, et al. Key production processes and influencing factors of nitrous oxide emissions from agricultural soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2019, 25(10): 1781–1798.
- [31] CHENG Y, WEI X, HUANG R, et al. Extremely high N_2O but unexpectedly low NO emissions from a highly organic and chemical fertilized peach orchard system in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 246: 202–209.
- [32] JIA W L, LIANG S, ZHANG J, et al. Nitrous oxide emission in low oxygen simultaneous nitrification and denitrification process: Sources and mechanisms[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 136: 444–451.
- [33] ZHANG J B, Müller C, CAI Z C. Heterotrophic nitrification of organic N and its contribution to nitrous oxide emissions in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 84: 199–209.
- [34] XIE B, GU J, YU J, et al. Effects of N fertilizer application on soil N_2O emissions and CH_4 uptake: A two-year study in an apple orchard in eastern China[J]. *Atmosphere*, 2017, 8(10): 181–193.
- [35] 陈浩, 李博, 熊正琴. 减氮及硝化抑制剂对菜地氧化亚氮排放的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 938–947. CHEN H, LI B, XIONG Z Q. Effects of N reduction and nitrification inhibitor on N_2O emissions in intensive vegetable field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(4): 938–947.
- [36] 武志杰, 史云峰, 陈利军. 硝化抑制作用机理研究进展[J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 962–970. WU Z J, SHI Y F, CHEN L J. Progress of research on nitrification inhibitory mechanism[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(4): 962–970.