

王峰, 陈玉真, 吴志丹, 等. 酸性茶园土壤氨挥发及其影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4):808-816.

WANG Feng, CHEN Yu-zhen, WU Zhi-dan, et al. Ammonia volatilization and its influencing factors in tea garden soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4):808-816.

酸性茶园土壤氨挥发及其影响因素研究

王峰^{1,2}, 陈玉真^{1,2}, 吴志丹^{1,2}, 江福英^{1,2}, 翁伯琦², 尤志明^{1,2*}

(1.福建省农业科学院茶叶研究所, 福建 福安 355015; 2.福建省红壤山地农业生态过程重点实验室, 福州 350013)

摘要:氨挥发是土壤氮素损失的主要途径之一。利用大型水泥槽田间试验,采用通气法研究了不同施氮量和施氮时期对茶园土壤氨挥发的影响,同时测定土壤铵态氮和硝态氮含量,结合气象因子进行偏相关分析,探讨了氨挥发的影响因素。设置CK(未施氮)、N1(减量化施氮, 225 kg·hm⁻²)和N2(常规施氮, 450 kg·hm⁻²)共3个处理,春季追肥、秋季追肥和冬季基肥比例为3:3:4。结果表明:茶园土壤氨挥发损失量为13.01~60.85 kg·hm⁻²,氨挥发损失率为10.63%~12.42%;施氮既是氨挥发峰值出现的主要原因,也能显著增加土壤氨挥发量($P<0.05$),N1和N2处理增幅分别为214.78%和367.72%,其增幅效应在冬季基肥期更显著;不同施氮时期对氨挥发量影响很大,冬季基肥期挥发量约占全年氨挥发损失量的50%,与冬季基肥期间土壤铵态氮浓度高且持续时间较长有关。偏相关分析表明,土壤氨挥发与铵态氮含量、地温和空气相对湿度呈显著或极显著正相关,与土壤水分和气温呈极显著负相关,与土壤硝态氮含量相关性不显著。

关键词:茶园土壤;施氮量;施氮时期;氨挥发;影响因素分析

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)04-0808-09 doi:10.11654/jaes.2016.04.027

Ammonia volatilization and its influencing factors in tea garden soils

WANG Feng^{1,2}, CHEN Yu-zhen^{1,2*}, WU Zhi-dan^{1,2}, JIANG Fu-ying^{1,2}, WENG Bo-qi², YOU Zhi-ming^{1,2*}

(1.Tea Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuan 355015, Fujian, China; 2.Fujian Province Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Hilly Red Soil, Fuzhou 350013, China)

Abstract: Ammonia(NH₃) volatilization is a main pathway of nitrogen loss in tea garden soils. In situ experiments using cement tanks combined with venting approach were conducted to study the effects of rates and time of nitrogen applications on ammonia volatilization in acid tea gardens. The experiment included three nitrogen treatments, i.e. CK(control, no N application), N1(reducing N fertilization, 225 kg·hm⁻²) and N2(traditional nitrogen rate, 450 kg·hm⁻²). The nitrogen was applied at three times as top dressing in spring, top dressing in autumn and basal dressing in winter at a proportion of 3:3:4. Soil NH₄⁺-N and NO₃⁻-N content was analyzed and also correlated with climatic factors. Results showed that total NH₃-N volatilization losses varied from 13.01 to 60.85 kg·hm⁻². The percentages of lost NH₃-N to the total amount of N applied ranged from 10.63% to 12.42%. Compared with the CK, NH₃-N volatilization losses were 214.78% and 367.72% higher in N1 and N2 treatments, respectively. The NH₃-N volatilization also varied significantly among application stages, with more NH₃-N volatilization losses in winter basal dressing than in spring or autumn top dressing. About 50% of total N was lost via volatilization in winter basal dressing, possibly attributable to high NH₄⁺-N content over a longer time period in soils. Partial correlation analysis showed that nitrogen volatilization was significantly positively correlated with NH₄⁺-N content in soils, soil temperature, and air relative humidity, but negatively with soil moisture and air temperature. No correlation was found between nitrogen volatilization and soil NO₃⁻-N content.

Keywords: acid tea garden soil; N application rate; N-application time; nitrogen volatilization; association analysis

收稿日期:2015-09-16

基金项目:国家科技支撑计划(2014BAD15B01);福建省公益类科研院所专项(2014R1012-10,2015R1012-5);国家茶产业体系宁德站(CARS-23)

作者简介:王峰(1985—),男,湖南衡阳人,助理研究员,研究方向为茶树栽培与环境生态。E-mail:82458lin@163.com

*通信作者:尤志明 E-mail:847842412@qq.com

氨挥发是土壤氮素气态损失的重要途径,其损失量有时高达施氮量的40%~50%^[1]。土壤氨挥发过程受到多种因素的影响,如土壤状况(质地、pH及肥力条件等)^[2]、环境因子^[3-4](温湿度、风速及降雨等)和管理措施^[5-6](施肥、灌溉及耕作等)。有研究表明^[7],氨挥发与土壤pH值密切相关,在相同铵态氮浓度条件下,pH每升高1个单位,土壤氨挥发量增加10倍。同时,由于施氮肥直接增加了土壤氨挥发过程的底物浓度,进而对土壤氨挥发过程产生直接影响^[8-9],但不同生态系统受氮肥的影响与施氮量、施肥时期和方式有关。

茶树是叶用作物,对氮素供应量需求较高,随着周期性的采摘和修剪,必须对茶树定时进行追肥,以满足茶树生长与茶叶品质的需求。我国茶园普遍存在高氮栽培现象^[10],平均每年施纯氮量高达737.7 kg·hm⁻²。同时,因茶农习惯施肥方式多数以撒施为主,氮素损失量较大。以往有关氨挥发的研究北方多集中于土壤pH较高的小麦^[11]、玉米^[12]或棉花^[13],南方则集中于水稻^[14]和菜地^[15],而有关酸性茶园土壤氨挥发影响尚未见报道。茶园土壤为典型的酸性土壤,pH多在4.0~5.0之间,不利于氨挥发过程。但施用尿素后,在

短时间内pH值会上升,从而促进土壤氨挥发^[16];同时,施肥时期存在“看天施肥”现象,尿素被撒施在茶园土壤表面,大量氮肥残留浅表层,在阳光的照射和风力的作用下可能会产生大量的氨挥发。在此背景下,本文通过水泥池小区试验,开展施氮对茶园土壤氨挥发损失动态影响的试验,研究茶园土壤氨挥发损失规律及其影响因素,以期为进一步优化氮肥管理、提高氮素利用率提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

试验于2014年1—12月在福建省农业科学院茶叶研究所试验基地进行(119°57'E,22°22'N),年均气温19.3℃,年均降雨量1646 mm,属于中亚热带季风气候。春季、秋季和冬季施肥期间的降雨、温度和空气相对湿度见图1,数据来源于试验基地安装的自动气象站。本试验在大型水泥池中进行,水泥池面积为1.8 m²(长2 m,宽0.9 m),深0.9 m,土深为0.8 m。供试土壤为砂质红壤,土壤pH4.85,有机碳含量3.69 g·kg⁻¹,全氮0.30 g·kg⁻¹,碱解氮26.40 mg·kg⁻¹,有效磷4.81 mg·kg⁻¹,速效钾60.32 mg·kg⁻¹,C/N为12.38。试验茶

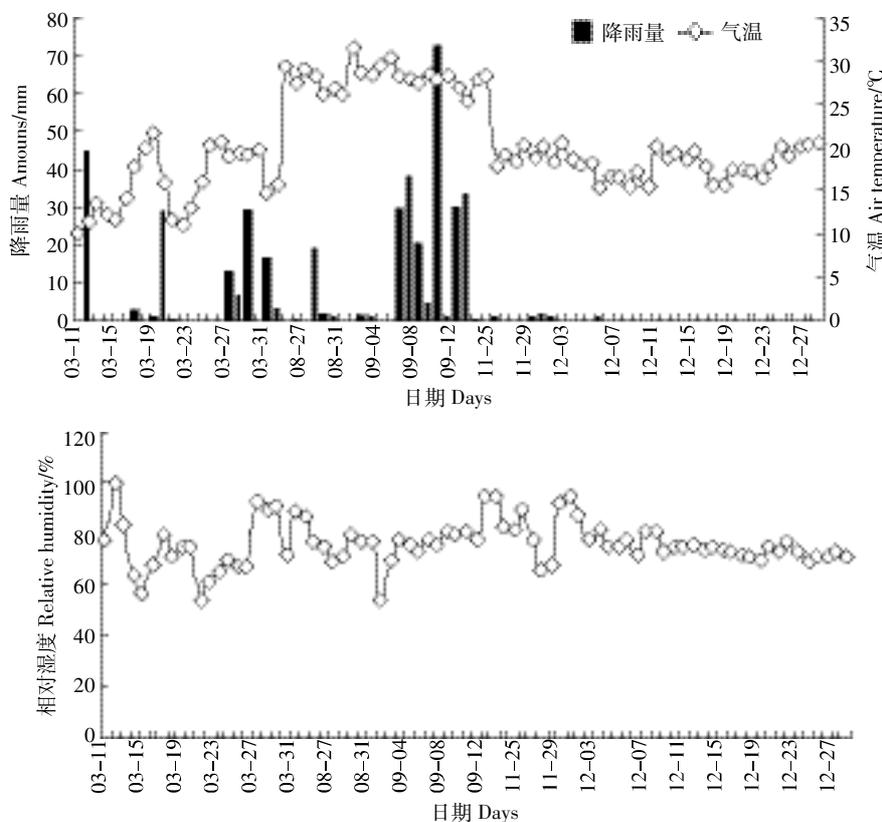


图1 试验期间的气候因子变化

Figure 1 Dynamics of rainfall, air temperature and relative humidity during experimental period

树为福建省农业科学院茶叶研究所新选育茶树良种“优4”，每小区种植5丛，丛距30 cm，茶树定植时间为2010年3月(移栽茶树为长势一致的3年生茶树)。

共设3个施氮处理， $0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (CK)，减量化施氮 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N1)，常规氮肥 $450\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N2)，4次重复，完全随机排列。氮肥分春季追肥(占总量的30%，2014年3月11日施肥)、秋季追肥(占总量的30%，2014年8月27日施肥)和冬季基肥(占总量的40%，2014年11月25日施肥)，氮肥品种为尿素；钾肥为硫酸钾，每个小区用量为 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，施肥时期和比例与氮肥一致；每个处理均一次性施入 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的 P_2O_5 作底肥，施入时间在冬季基肥时。施肥方式为表层撒施，称好每个小区所用的肥料均匀撒在土壤表面。

1.2 采样与测定方法

氨挥发的测定采用双层海绵通气法，该方法测定结果的准确度和精确度高，回收率可达99.5%^[17]。通气法收集装置由无底PVC管制成(外径16 cm，内径15 cm，高15 cm)，收集装置放置于茶树树冠下(图2)。测定过程中分别将两块厚度均为2 cm、直径为16 cm的海绵均匀浸以15 mL的磷酸甘油溶液(50 mL磷酸+40 mL丙三醇，定容至1 L)，置于PVC塑料管中，下部海绵距管底5 cm，上部海绵与管顶部相平(降雨量大时用塑料薄膜覆盖避雨)。下部海绵用于吸收土壤挥发出的 NH_3 ，上部海绵用于防止空气中的 NH_3 和灰尘进入。于施肥后的第二天开始取样，在各小区的不同位置，随机放置一个收集装置(固定至收集结束)，每次上午8:00—10:00开始收集，每次收集时间为24 h，直至监测到施氮处理与对照的氨挥发通量无差异时为止。取样时，将收集装置下部的海绵取出，迅速装入自封袋并编号，同时换上另一块刚浸过

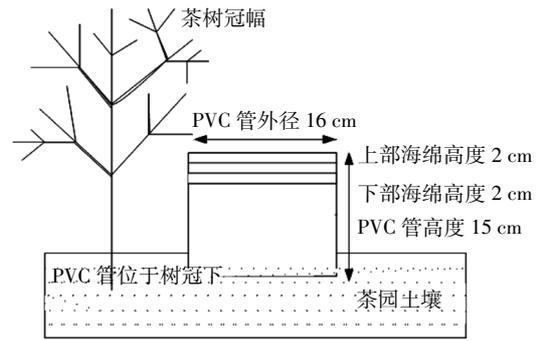


图2 氨挥发收集装置及放置位置

Figure 2 Sketch diagram and setup of of NH_3 absorption device

磷酸甘油的海绵，上层海绵每一次收集时同时更换。把取下的海绵迅速带回实验室，分别放入500 mL塑料瓶中，加入KCl溶液($2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)300 mL，使海绵完全浸于其中，振荡1 h，浸提液中的铵态氮采用靛酚蓝比色法测定。

不同施肥时期0~5 cm土层水分和温度变化见图3。春季测定时间为施肥后第2、4、6、9、13、17、21 d，秋季测定时间为施肥后2、4、6、8、10、14、20 d，冬季测定时间为施肥后第2、5、7、10、14、17、22、28、33 d。同时多点采集0~5 cm土壤样品，混合后用于测定土壤铵态氮、硝态氮和水分，并用地温计测定5 cm

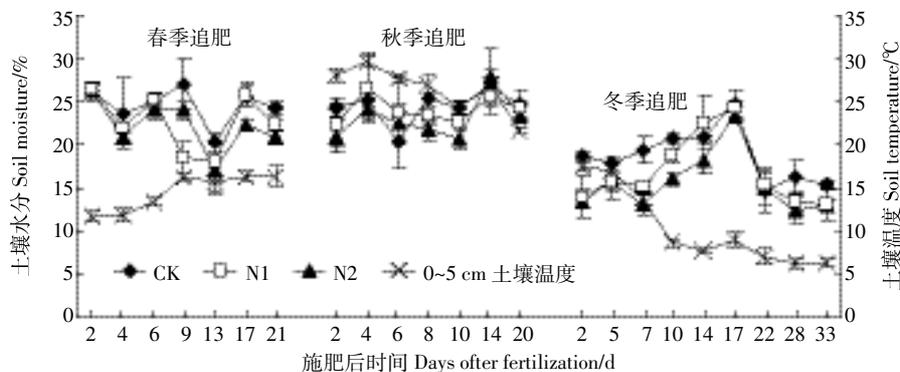


图3 各施肥时期0~5 cm 土层土壤水分和温度变化

Figure 3 Soil moisture and temperature in 0~5 cm depth during each fertilization period

土层温度。

土壤理化性质按照中国土壤学会编写的《土壤农业化学分析方法》进行^[8],土壤含水量采用烘干法测定,土壤pH值采用pH计测定(土水比为1:2.5),土壤中铵态氮和硝态氮分别采用靛酚蓝比色法和双波长比色法($2.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的KCl浸提液)。

1.3 计算方法和数据处理

土壤的氨挥发速率:

$$\text{NH}_3\text{-N}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}) = \frac{M}{A \cdot D} \times 10^{-2}$$

式中: M 为通气法单个装置 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均每次测定值,mg; A 为收集装置的截面积, m^2 ; D 为每次连续收集的时间,d。

土壤氨挥发累积量^[9]:

$$S(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (V_i + V_{i-1})(T_i - T_{i-1})$$

式中: S 为土壤氨挥发累积损失量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; n 表示施肥后测定的次数; T_i 表示第*i*次测定施肥后的时间,d; V_i 为第*i*次测定时氨挥发速率, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

氨挥发损失率=(施肥处理氨挥发累积量-不施氮处理氨挥发累积量)/施氮量 $\times 100\%$

采用Microsoft Excel 2003进行图表绘制,并利用SPSS16.0统计软件进行方差分析、Pearson相关分析和偏相关分析。

2 结果与分析

2.1 施肥后茶园土壤表层(0~5 cm)土壤铵态氮和硝态氮含量的动态变化

由图4A看出,3次施肥后0~5 cm表层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度迅速增加,然后随时间延长持续下降。春季和秋季追肥后2~4 d土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量达到峰值,意味此时茶园土壤尿素水解速率较快,其中春季和秋季追肥期N2处理前6 d土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著高于N1处理($P < 0.05$);而冬季基肥期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在第7~10 d时才达到峰值,说明此阶段尿素水解速率较慢,且前5次测定时N2处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著高于N1处理($P < 0.05$)。冬季基肥期土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量高于春季和秋季追肥期,冬季基肥期N2处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 峰值达到了 $299.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是春季和秋季追肥期的2倍,而施氮量仅为前两次的1.3倍,与3次施氮时期的气候条件和茶树生长状况不同有关。

如图4B所示,土壤 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量在施肥后逐渐增

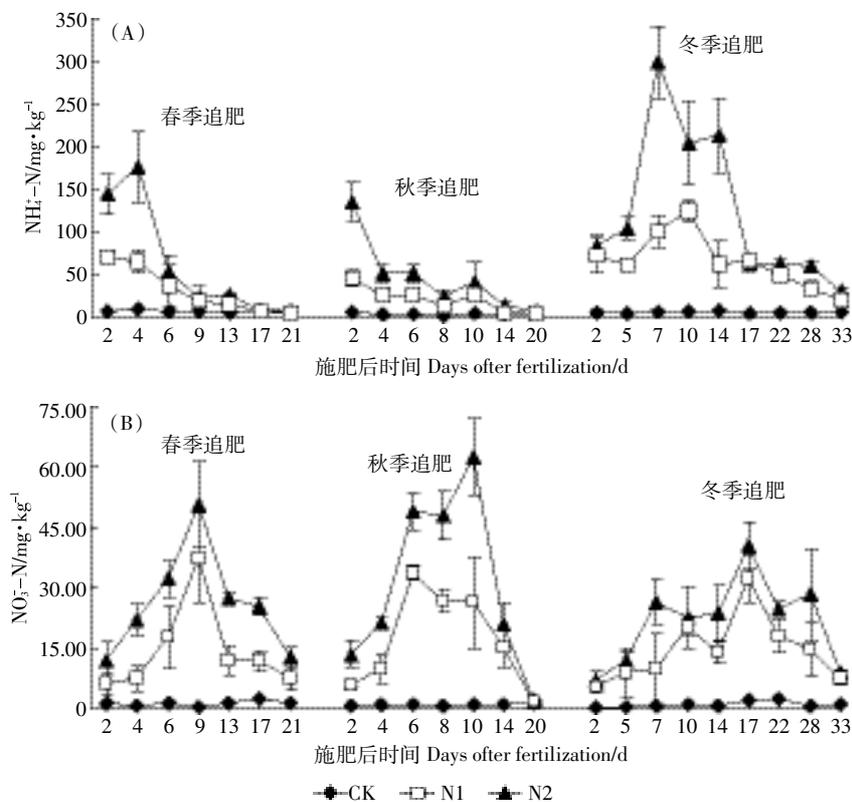


图4 试验期间土壤铵态氮和硝态氮含量的变化

Figure 4 Changes in $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^+\text{-N}$ concentrations in top soil during experimental period

加,春季和秋季追肥时各处理在第9~10 d时达到峰值,而冬季基肥各处理在第17 d时才达到峰值,且春季和秋季追肥时土壤 NO_3^- -N峰值均显著高于冬季基肥期($P<0.05$);然后经茶树吸收、淋溶和反硝化过程,土壤 NO_3^- -N含量逐渐降低。整个试验期间,N2处理的土壤 NO_3^- -N含量均高于N1和CK处理,且春季和秋季追肥期土壤硝态氮的含量基本高于冬季,可能与土壤水热因子、 NO_3^- -N淋失和茶树吸收能力有关。

2.2 施氮后茶园土壤氨挥发速率的动态变化

茶树周年生长时期的氨挥发动态变化如图5所示。CK条件下,土壤氨挥发的变化相对较小,没有出现明显的高峰,氨挥发速率为 $0.04\sim 0.54\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。施氮条件下,茶园土壤氨挥发速率显著增加($P<0.05$),3次施氮时期氨挥发速率变化规律略有不同。春季施氮后第2 d时氨挥发速率就达到了峰值,N2处理的峰值显著高于N1处理($P<0.05$),此后持续下降,N2和N1处理间差异不显著($P>0.05$);秋季和冬季施氮后氨挥发速率日变化规律基本相同,在第4~7

d时达到峰值,秋季追肥期N2和N1处理氨挥发速率差异不显著($P>0.05$),冬季基肥期N2处理前3次氨挥发速率显著高于N1处理($P<0.05$),随后逐渐降低,直至无明显变化。总体而言,N2处理氨挥发速率基本高于N1处理;冬季基肥期各个施氮处理氨挥发速率高于春季和秋季追肥各个施氮处理,且氨挥发持续时间也明显高于春季和秋季追肥期。

2.3 茶园土壤氨挥发损失量分析

试验期间不同施氮处理的土壤氨挥发积累量和损失率见表1。全年茶园土壤各处理氨挥发积累量为 $13.01\sim 60.85\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,氨挥发损失率为 $10.63\%\sim 12.42\%$,且随着施氮量的增加而显著增加($P<0.05$),分别增加了 214.78% 和 367.72% 。进一步对各施肥时期氨挥发量和损失率进行比较后发现,氨挥发累积排放量和损失率均以冬季基肥最高,氨挥发量为 $6.52\sim 34.99\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,损失率为 $13.06\%\sim 15.81\%$,各处理之间差异显著($P<0.05$);春季追肥次之,氨挥发量为 $4.14\sim 14.49\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,损失率为 $6.89\%\sim 10.26\%$,各处理

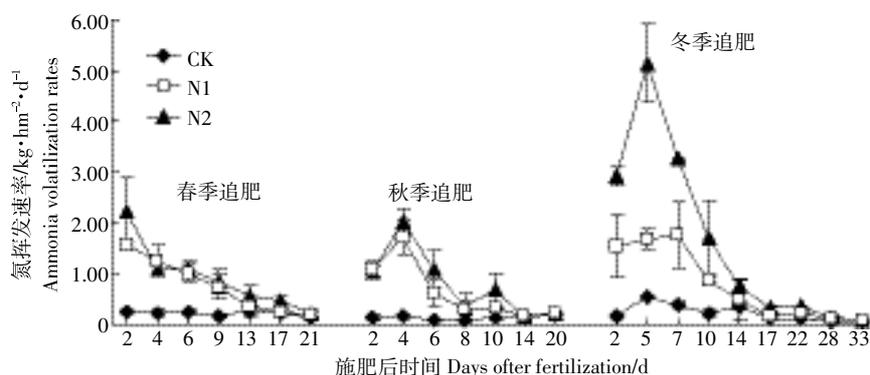


图5 土壤氨挥发速率动态变化

Figure 5 Changes in ammonia volatilization rates in soil

表1 不同施肥时期茶园土壤氨挥发积累量与损失率

Table 1 Cumulative NH_3 -N volatilization losses and loss rates in tea garden soils at different fertilization stages

处理	春季追肥		秋季追肥		冬季基肥		总计	
	挥发积累量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	损失率/%	挥发积累量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	损失率/%	挥发积累量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	损失率/%	挥发积累量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	损失率/%
CK	$4.14\pm 0.51\text{cB}$		$2.35\pm 0.22\text{bC}$		$6.52\pm 0.44\text{cA}$		$13.01\pm 0.48\text{c}$	
各时期所占比例	31.85%		18.06%		50.08%		100%	
N1	$11.84\pm 1.62\text{bB}$	10.26 ± 1.27	$10.83\pm 1.28\text{aB}$	11.31 ± 1.67	$18.28\pm 3.01\text{bA}$	13.06 ± 3.09	$40.95\pm 1.29\text{b}$	12.42 ± 0.69
各时期所占比例	28.92%		26.45%		44.63%		100%	
N2	$14.49\pm 0.79\text{aB}$	6.89 ± 0.31	$11.38\pm 1.91\text{aC}$	6.01 ± 1.27	$34.99\pm 1.66\text{aA}$	15.81 ± 0.74	$60.85\pm 3.01\text{a}$	10.63 ± 0.70
各时期所占比例	23.81%		18.69%		57.49%		100%	

注:表中小写字母表示不同施氮量处理之间氨挥发的差异,大写字母表示不同施肥时期之间氨挥发的差异。

Note: Different small letters within each column indicate significant difference between different N rates at $P<0.05$ level; different capital letters within each row indicate significant difference between different N-application times at $P<0.05$ level.

之间差异显著($P<0.05$);秋季追肥最低,氨挥发量为 $2.35\sim 11.38\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,损失率为 $6.01\%\sim 11.31\%$, N_2 和 N_1 处理间差异不显著($P>0.05$);冬季基肥所占比例达到了 $44.63\%\sim 57.49\%$,显著高于春季和秋季追肥($P<0.05$)。

2.4 茶园土壤氨挥发的影响因子

如表2所示,土壤氨挥发与土壤 NH_4^+-N 含量呈极显著 Pearson 正相关($P<0.01$),与土壤水分呈显著 Pearson 负相关($P<0.05$),与其他环境因子相关性不显著($P>0.05$)。但有时由于某一共同变量的干扰会导致2个变量间的假相关,利用单一相关性分析很难正确解析各因素对氨挥发的影响,为排除其他因素的干扰,对各因子分别作偏相关分析(表2)。结果显示,除了土壤 NO_3^--N 含量之外,土壤氨挥发与土壤 NH_4^+-N 含量、地温和空气相对湿度存在显著或极显著正相关性,与土壤水分和气温存在极显著负相关性。

3 讨论

3.1 施氮量和施氮时期对茶园土壤氨挥发的影响

氮肥施用过程中的氨挥发是氮素气态损失的一个重要途径,氨挥发量因气候、生态类型和土壤条件

的差异而有所不同。有关酸性旱地土壤氨挥发是否为酸性土壤氮肥损失的主要途径^[25-26],目前研究结果差异较大。本研究中酸性茶园土壤氨挥发量达到 $13.01\sim 60.85\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,氨挥发损失率为 $10.63\%\sim 12.42\%$,氨挥发损失率高于杨树^[20]、苹果^[21]和槟榔地^[22],与橡胶林^[23]相当,低于蔬菜地^[24]。传统理论认为酸性条件下氨挥发过程受到抑制,高的pH提高了 NH_4^+ 向 NH_3 溶液的转化速率^[27],进而加快了氨挥发。茶园土壤为典型的酸性土壤,pH值多在 $4.0\sim 5.0$ 之间(本试验地pH值为4.85),较高氨挥发损失率与其高施氮量、施肥操作、气候条件及土壤特性有关。

由表3可知,相比苹果园($75\sim 300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)和杨树地($90\sim 180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),茶园土壤施氮量较大,因而其氨挥发量较大。撒施条件下尿素的氨挥发损失率能达到 50% ^[28],深施覆土或配施有机肥的条件下土壤氨挥发速率较低。从表3可以看出,酸性菜地(pH5.2)三次尿素撒施的氨挥发损失率为 $21.3\%\sim 24.0\%$,穴施氨挥发损失率仅为 17.6% ,分析认为太阳辐射对地面的增温效果显著,促进了氨挥发;苹果园尿素配施有机肥条件下(撒施覆土),氨挥发损失率仅为 $2.29\%\sim 3.34\%$,配施有机肥会显著降低氨挥发量。本试验中施肥操作与当地茶农代表性的施肥模式一致,尿素被撒施在茶园土壤表面,大量氮肥残留浅表层,在阳光的照射和风力的作用下会产生大量的氨挥发^[29-30],此时气候条件成为关键因素。从本地区气象资料可知^[31],试验区域光照时数大于 1700 h ,光照强,地面气温较高,有利于促进脲酶活性,促进尿素快速分解为铵态氮,进而促进了氨挥发。有研究表明,酸性土壤施用尿素后,短时间内由于尿素的水解使得土壤pH值会上升^[32],从而增加氨挥发的可能,前期培养试验也证实了这一点^[33]。另外,本试验土壤质地为砂质土,有机质含量很低,通透性强,土壤空气扩散性与流动性好,尿素施入后土层对氨气扩散的阻隔和吸附能力较弱,有利于氨挥发^[34]。由此推断,高施氮量和施肥方式(撒施)是导致茶园土壤氨挥发严重的重要因素。

表2 土壤氨挥发速率与各影响因素的偏相关系数($n=69$)

Table 2 Partial correlation coefficients of ammonia volatilization with influencing factors ($n=69$)

	皮尔逊相关	偏相关
$r(Y, X_1)$	0.63**	0.64**
$r(Y, X_2)$	0.15	-0.02
$r(Y, X_3)$	-0.24*	-0.34**
$r(Y, X_4)$	0.05	0.48**
$r(Y, X_5)$	-0.10	-0.34**
$r(Y, X_6)$	0.12	0.30*

注: X_1 代表 NH_4^+-N 含量; X_2 代表 NO_3^--N 含量; X_3 代表土壤水分; X_4 代表地温; X_5 代表气温; X_6 代表空气相对湿度;**表示相关性达到极显著水平($P<0.01$),*表示相关性达到显著水平($P<0.05$)。

Note: X_1 -- NH_4^+-N content; X_2 -- NO_3^--N content; X_3 -- soil moisture; X_4 -- soil temperature; X_5 -- air temperature; X_6 -- air relative humidity;** denotes 0.01 significant level;* denotes 0.05 significant level.

表3 酸性旱地土壤氨挥发量及损失率

Table 3 Cumulative NH_3-N volatilization losses and loss rates in acid upland soils grown with different plants

植被类型	施肥方式	施氮量和种类	氨挥发量	损失率/%
杨树 ^[20]	撒施覆土	$90\sim 180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 尿素	$11.97\sim 20.99\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	$9.31\sim 16.25$
苹果 ^[21]	撒施覆土	$75\sim 300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 尿素和有机肥配施	$7.33\sim 10.39\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	$2.29\sim 3.34$
槟榔 ^[22]	穴施覆土并灌水	$0.05\sim 0.20\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 尿素和有机肥配施	$12.56\sim 20.03\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	—
橡胶 ^[23]	穴施覆土	$0.16\sim 0.24\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 尿素	$9.34\sim 26.04\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$	$3.89\sim 11.18$
菜地 ^[24]	穴施、撒施覆土并浇水	$50.20\sim 193.80\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 尿素和有机肥配施	$8.20\sim 38.30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	$17.61\sim 24.01$

施氮量显著影响土壤氨挥发过程,并随着施氮量的增加而显著增加^[35]。本研究中,施氮处理的茶园土壤氨挥发量显著高于对照($P<0.05$),且常规施氮量处理显著高于减量化施氮处理($P<0.05$)。从表2可以看出,土壤氨挥发与0~5 cm土层铵态氮浓度呈极显著正相关,也说明氮肥施用量越高越会导致土壤铵态氮浓度升高,进而增加土壤的氨挥发速率。尿素施入土壤后迅速水解,表层土壤铵态氮迅速增加,为氨挥发过程提供了充足的底物,使氨挥发很快达到峰值;然后经过茶树的吸收、土壤铵态氮的微生物利用及硝化过程,土壤铵态氮逐渐转化为硝态氮,使得氨挥发速率逐渐降低。不同施肥时期对土壤氨挥发影响很大,在全年的3次施氮中冬季基肥期氨挥发损失最大,并远高于2次追肥期。这与冬季施肥期间土壤铵态氮浓度高且持续时间较长有关:一方面,冬季基肥期施氮量最大,占全年的40%,因而土壤铵态氮浓度较高,氨挥发速率较大;另一方面,冬季基肥期间基本没有降雨,日平均气温(15.3~20.5℃)和地温(6.5~17.5℃)较低,土壤微生物、脲酶和硝化酶活性可能受到一定程度抑制^[36],从而延长了尿素的水解过程。此外,冬季茶树的生长特性也会影响氨挥发,12月茶树进入休眠期^[37],养分需求不高,对铵态氮的吸收能力较弱(茶树为喜铵作物),表层土壤铵态氮含量较高(图3A),从而使氨挥发速率要高于春季和秋季追肥期。相反,春季和秋季追肥前期出现明显降雨,尿素水解后容易下渗,且此时茶树铵态氮吸收需求量大,导致表层铵态氮迅速下降,氨挥发也随之下降。

3.2 环境因子对茶园土壤氨挥发的影响

氨挥发与气温、地温、空气相对湿度、土壤水分和 NH_4^+-N 浓度等因素密切相关。在没有限制因素存在的条件下,氨挥发速率随表层土壤铵态氮含量的增加而增大,两者间呈显著正相关^[38],与本研究结果一致。温度对土壤氨挥发的影响是复杂多变的。升温能增加水中的 $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ 的比率,降低 NH_3 在水中的溶解度,从而促进土壤中 NH_3 向大气扩散^[39];同时,温度升高还可以增强土壤脲酶和微生物活性,有利于尿素水解,增加 NH_3 的排放。本研究中0~5 cm地温与土壤氨挥发呈极显著正相关,与其他人的结果基本一致^[40-41]。然而分析不同施氮时期的氨挥发量却发现,地温最高的秋季追肥期氨挥发量最小,低温最低的冬季基肥期氨挥发损失量最大,说明受到其他环境因子和茶树生长特性的综合影响。秋季追肥期地温最高,硝化作用也最强烈,在降雨的影响下,部分氮素随

渗漏水下移使表层土壤 NH_4^+-N 的浓度降低;同时秋季追肥期茶树对 NH_4^+-N 吸收旺盛,表层土壤 NH_4^+-N 含量迅速下降,使得氨挥发速率最低。冬季地温和气温较低,尿素水解、硝化作用和茶树吸收能力较弱,使得铵态氮浓度高且持续时间长,故氨挥发量大。

土壤水分显著影响土壤氨挥发。当土壤含水量较低时,少量的降雨或灌溉能增加土壤水分含量,加速了尿素的水解,土壤中 NH_4^+-N 浓度迅速升高,促进了铵态氮向氨气的转化,进而增加了氨挥发损失量^[42];而大量降雨或灌溉时,尿素在水解前随水分渗入到下层土壤,增加了土壤颗粒对铵态氮的吸附和植物根系吸收的概率,并且氮素下渗到一定深度后增加了氨扩散上升到土壤表面的阻力^[43],降低了表层土壤 NH_4^+-N 的浓度,从而抑制了氨挥发。春季和秋季追肥前期均出现较大的降雨,使得土壤含水量处于较高的水平,有利于氮素的淋溶下移,进而抑制氨挥发。

综合以上可以看出,尿素表施的情况下酸性茶园土壤均有较高氨挥发速率,氨挥发损失率为10.63%~12.42%,冬季基肥期氨挥发速率大且持续时间长。福建春季和秋季降雨量较多,虽然导致土壤氨挥发量降低,但容易引起地表和地下径流损失,应该选择多云天气撒施以减少氮素损失;冬季为广大茶区传统的农闲季节,在未考虑劳动力成本因素的前提下,配施缓释氮肥和沟施覆土能有效降低土壤氨挥发。由于氮素是十分活跃的元素,即使细微的施肥操作差别,对氨挥发量影响也显著。同时,野外试验的环境条件变化较大,影响土壤氨挥发的因素很多,本研究仅监测了一年的三个施肥周期的土壤氨挥发,对于酸性茶园土壤氨挥发变化状况仍需进一步研究。

4 结论

(1)本试验采用田间试验和原位通气法,测得酸性茶园土壤氨挥发损失量为13.01~60.85 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,氨挥发损失率为10.3%~12.42%;施氮既是氨挥发峰值出现的主要原因,也能显著增加土壤氨挥发量($P<0.05$),增幅为214.78%和367.72%,并且施氮对冬季基肥期影响更明显。

(2)不同施氮时期对氨挥发量影响很大。冬季基肥期氨挥发持续时间长且损失量大,氨挥发量介于6.55~34.99 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,约占全年氨挥发损失量的50%,与冬季基肥期间土壤铵态氮浓度高且持续时间较长有关;春季追肥期次之,秋季追肥期最低。

(3)偏相关分析表明,土壤氨挥发与土壤 NH_4^+-N

含量、地温和空气相对湿度存在显著或极显著正相关性,与土壤水分和气温存在极显著负相关性。

参考文献:

- [1] 李菊梅,李冬初,徐明岗,等.红壤双季稻田不同施肥下的氨挥发损失及其影响因素[J].生态环境,2008,17(4):1610-1613.
LI Jiu-mei, LI Dong-chu, XU Ming-gang, et al. Ammonia volatilization and its influence factors under different fertilization in red paddy soil with double rice cropping system[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4):1610-1613.
- [2] Tao W, Ukwuani A T. Coupling thermal stripping and acid absorption for ammonia recovery from dairy manure; Ammonia volatilization kinetics and effects of temperature, pH and dissolved solids content[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 280:188-196.
- [3] 朱小红,马中文,马友华,等.施肥对巢湖流域稻季氨挥发损失的影响[J].生态学报,2012,32(7):2119-2126.
ZHU Xiao-hong, MA Zhong-wen, MA You-hua, et al. Effect of fertilization on ammonia volatilization from paddy fields in Chao Lake Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(7):2119-2126.
- [4] Miles D M, Rowe D E, Cathcart T C. High litter moisture content suppresses litter ammonia volatilization[J]. *Poultry Science*, 2011, 90(7):1397-1405.
- [5] 董文旭,胡春胜,陈素英,等.保护性耕作对冬小麦-夏玉米农田氮肥氨挥发损失的影响[J].中国农业科学,2013,46(11):2278-2284.
DONG Wen-xu, HU Chun-sheng, CHEN Su-ying, et al. Effect of conservation tillage on ammonia volatilization from nitrogen fertilizer in Winter Wheat-Summer Maize Cropping system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(11):2278-2284.
- [6] Xu J, Peng S, Yang S, et al. Ammonia volatilization losses from a rice paddy with different irrigation and nitrogen managements[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 104:184-192.
- [7] Martines A M, Nogueira M A, Santos C A, et al. Ammonia volatilization in soil treated with tannery sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(12):4690-4696.
- [8] 山楠,赵同科,毕晓庆,等.不同施氮水平下小麦田氨挥发规律研究[J].农业环境科学学报,2014,33(9):1858-1865.
SHAN Nan, ZHAO Tong-ke, BI Xiao-qing, et al. Ammonia volatilization from wheat soil under different nitrogen rates[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(9):1858-1865.
- [9] Jantalia C P, Halvorson A D, Follett R F, et al. Nitrogen source effects on ammonia volatilization as measured with semi-static chambers[J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104(6):1595-1603.
- [10] 阮建云,吴洵,石元值,等.中国典型茶区养分投入与施肥效应[J].土壤肥料,2001,5:9-13.
RUAN Jian-yun, WU Xun, SHI Yuan-zhi, et al. Nutrient input and evaluation of fertilization efficiency in typical tea areas of China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2001, 5:9-13.
- [11] 翟学旭,王振林,戴忠民,等.灌溉与非灌溉条件下黄淮冬麦区不同追氮时期农田土壤氨挥发损失研究[J].植物营养与肥料学报,2012,19(1):55-67.
ZHAI Xue-xu, WANG Zhen-lin, DAI Zhong-min, et al. Ammonia volatilization loss in Huang Huai winter wheat cultivation areas under irrigated and rain fed conditions[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(1):1044-1050.
- [12] 纪玉刚,孙静文,周卫,等.东北黑土玉米单作体系氨挥发特征研究[J].植物营养与肥料学报,2009,15(5):1044-1050.
JI Yu-gan, SUN Jing-wen, ZHOU Wei, et al. In situ study of ammonia volatilization from black soil with maize monoculture system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5):1044-1050.
- [13] 李琦,廖娜,张妮,等.棉花秸秆及其生物炭对滴灌棉田氨挥发的影响[J].农业环境科学学报,2014,33(10):1987-1994.
LI Qi, LIAO Na, ZHANG Ni, et al. Effects of cotton stalk and its biochar on ammonia volatilization from a drip irrigated cotton[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10):1987-1994.
- [14] Wang J, Wang D, Zhang G, et al. Effect of wheat straw application on ammonia volatilization from urea applied to a paddy field[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 94(1):73-84.
- [15] 靳红梅,常志州,吴华山,等.菜地追施猪粪沼液后NH₃和N₂O排放特征及氮损失率[J].植物营养与肥料学报,2013,19(5):1155-1165.
JIN Hong-mei, CHANG Zhi-zhou, WU Hua-shan, et al. NH₃ and N₂O emission and nitrogen loss rate from biogas liquid produced by pig slurry after topdressing on vegetable fields[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(5):1155-1165.
- [16] 蒋朝晖,曾清如,方至,等.不同温度下施入尿素后土壤短期内pH的变化和氨气释放特性[J].土壤通报,2004,35(3):299-302.
JIANG Zhao-hui, ZENG Qing-ru, FANG Zhi, et al. Short-term changes of pH and volatilization of ammonia from urea fertilizer in soil under different temperatures[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3):299-302.
- [17] 王朝辉,刘学军,巨晓棠.田间土壤氨挥发的原位测定-通气法[J].植物营养与肥料学报,2002,8(2):205-209.
WANG Zhao-hui, LIU Xue-jun, JU Xiao-tang. Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: Venting method[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2):205-209.
- [18] 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,2000:146-226.
LU Ru-kun. Analytical methods for soil agro-chemistry[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000:146-226.
- [19] 王淳,周卫,李祖章,等.不同施氮量下双季稻连作体系土壤氨挥发损失研究[J].植物营养与肥料学报,2012,18(2):349-358.
WANG Chun, ZHOU Wei, LI Zu-zhang, et al. Effects of different nitrogen application rates on ammonia volatilization from paddy fields under double-harvest rice system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2):349-358.
- [20] 程小娜,薛建辉,吴永波.杨麦间作系统土壤氨挥发特点分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2013,37(1):127-131.
CHENG Xiao-na, XUE Jian-hui, WU Yong-bo. Characteristics of soil ammonia volatilization in interplanting system of poplar and wheat[J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Science Edition)*, 2013, 37(1):127-131.

- [21] 葛顺峰, 姜远茂, 彭福田, 等. 春季有机肥和化肥配施对苹果园土壤氨挥发的影响[J]. 水土保持学报, 2010(5):199-203.
GE Shun-feng, JIANG Yuan-mao, PENG Fu-tian, et al. Effect of chemical fertilizers application combined with organic manure on ammonia volatilization in spring in apple orchard[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010(5): 199-203.
- [22] 卢丽兰, 甘炳春, 许明会, 等. 不同施肥与灌水量对槟榔土壤氨挥发的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(15):4477-4484.
LU Li-lan, GAN Bing-chun, XU Ming-hui, et al. Effect of different fertilization and irrigation practices on soil ammonia volatilization of Arecanut (*Areca catechu* L.)[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(15): 4477-4484.
- [23] 阮云泽, 张茂星, 陈鹏, 等. 热带人工橡胶林地砖红壤中氨挥发规律的研究[J]. 土壤, 2014, 46(3):466-469.
RUAN Yun-ze, ZHANG Mao-xing, CHEN Peng, et al. Characterization of ammonia volatilization from latosol soils in rubber plantation in tropical region[J]. *Soils*, 2014, 46(3):466-469.
- [24] 龚巍巍, 张宜升, 何凌燕, 等. 菜地氨挥发损失及影响因素原位研究[J]. 环境科学, 2011, 32(2):345-350.
GONG Wei-wei, ZHANG Yi-shen, HE Ling-yan, et al. In-situ and its measurement on volatilization loss of ammonia in the vegetable field influencing and its influencing factors[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(2):345-350.
- [25] Rochette P, Angers DA, Chantigny M H, et al. NH_3 volatilization, soil concentration and soil pH following subsurface banding of urea at increasing rates[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2013, 93(2):261-268.
- [25] 罗微, 茶正早, 屈明, 等. 砖红壤中氨挥发特征研究初报[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(1):118-122.
LUO Wei, CHA Zheng-zao, QU Ming, et al. Volatilization of ammonia from latosol soil after application of fertilizers[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(1): 118-122.
- [27] Cai G X, Fan X H, Zhu Z L, et al. Gaseous loss of nitrogen from fertilizers applied to wheat on a calcareous soil in North China Plain[J]. *Pedosphere*, 1998, 8:45-52.
- [28] 曹兵, 李新慧, 张琳, 等. 冬小麦不同基肥施用方式对土壤氨挥发的影响[J]. 华北农学报, 2001, 16(2):83-86.
CAO Bing, LI Xin-hui, ZHANG Lin, et al. Effect of different basal-dressing application methods on soil ammonia volatilization from winter wheat field[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2001, 16(2):83-86.
- [29] 朱兆良. 中国土壤氮素[M]. 南京:江苏科技出版社, 1992:171-185.
ZHU Zhao-liang. Nitrogen in soils of China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992: 171-185.
- [30] 宋勇生, 范晓晖, 林德喜, 等. 太湖地区稻田氨挥发及影响因素的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(2):265-269.
SONG Yong-sheng, FAN Xiao-hui, LIN De-xi, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2):265-269.
- [31] 彭云峰, 王琼. 近50年福建省日照时数的变化特征及其影响因素[J]. 中国农业气象, 2011, 32(3):350-355.
PENG Yun-feng, WANG Qiong. Variation of sunshine hours and its influence factors in last 50 years in Fujian Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(3):350-355.
- [32] 蒋朝晖, 曾清如, 皮荷杰, 等. 不同品种尿素施入土壤后pH值的变化和氨气释放差异[J]. 环境化学, 2009, 28(2):177-180.
JIANG Zhao-hui, ZENG Qing-ru, PI He-jie, et al. Change of pH and volatilization of ammonia by fertilizing different types of urea in soil[J]. *Environmental Chemistry*, 2009, 28(2): 177-180.
- [33] 王峰, 陈玉真, 尤志明, 等. 不同施氮量对两种茶园土壤硝化作用和pH值的影响[J]. 茶叶科学, 2015(1):82-90.
WANG Feng, CHEN Yu-zhen, YOU Zhi-ming, et al. Effects of different nitrogen application rates on nitrification and pH of two tea garden soil[J]. *Journal of Tea Science*, 2015(1):82-90.
- [34] Denmead O T, Freney J R, Simpson J R. Dynamics of ammonia volatilization during furrow irrigation of maize[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(1):149-155.
- [35] Jantalia C P, Halvorson A D, Follett R F, et al. Nitrogen source effects on ammonia volatilization as measured with semi-static chambers[J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104(6):1595-1603.
- [36] Fraser F C, Hallett P D, Wookey P A, et al. How do enzymes catalysing soil nitrogen transformations respond to changing temperatures?[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(1):99-103.
- [37] 王新超, 马春雷, 杨亚军, 等. 茶树细胞周期蛋白依赖激酶(CsCDK)基因cDNA全长克隆与分析[J]. 园艺学报, 2012, 39(2):333-342.
WANG Xin-chao, MA Chun-lei, YANG Ya-jun, et al. cDNA cloning and expression analysis of cyclin-dependent kinase (CsCDK) gene in tea plant[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2012, 39(2): 333-342.
- [38] 上官宇先, 师日鹏, 李娜, 等. 垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素[J]. 环境科学, 2012, 33(6):1987-1993.
SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, et al. Factors influencing ammonia volatilization in a winter wheat field with plastic film mulched ridges and unmulched furrows[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(6):1987-1993.
- [39] Sharpe R R, Harper L A. Soil, plant and atmospheric conditions as they relate to ammonia volatilization[J]. *Fertilizer Research*, 1995, 42:149-158.
- [40] Sanz-Cobena A, Misselbrook T H, Arce A, et al. An inhibitor of urease activity effectively reduces ammonia emissions from soil treated with urea under Mediterranean conditions[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 126(3):243-249.
- [41] Pfluke P D, Jokela W E, Bosworth S C. Ammonia volatilization from surface-banded and broadcast application of liquid dairy manure on grass forage[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40(2):374-382.
- [42] 贺发云, 尹斌, 金雪霞, 等. 南京两种菜地土壤氨挥发的研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(2):253-259.
HE Fa-yun, YIN Bin, JIN Xue-xia, et al. Ammonia volatilization from urea applied to two vegetable fields in Nanjing suburbs[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(2):253-259.
- [43] 郝小雨, 高伟, 王玉军, 等. 有机无机肥料配合施用对日光温室土壤氨挥发的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(21):4403-4414.
HAO Xiao-yu, GAO Wei, WANG Yu-jun, et al. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on ammonia volatilization from greenhouse vegetable soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(21):4403-4414.