



典型乌龙茶产区氮素平衡状况及减排潜力研究

穆聪, 陈晓辉, 林伟杰, 胡浩南, 吴良泉

引用本文:

穆聪, 陈晓辉, 林伟杰, 等. 典型乌龙茶产区氮素平衡状况及减排潜力研究[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 186–194.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0068>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

控释尿素对春玉米产量、氮效率及氮素平衡的影响

姬景红, 李玉影, 刘双全, 佟玉欣, 任桂林, 李杰, 刘颖, 张明怡

农业资源与环境学报. 2017, 34(2): 153–160 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0231>

不同氮肥管理方式对华北粮田²排放和作物产量的影响分析

舒晓晓, 王艳群, 李迎春, 彭正萍, 魏珊珊, 石新丽, 赵延伟

农业资源与环境学报. 2016, 33(4): 340–348 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0037>

基于生命周期评估的冬小麦-夏玉米种植系统碳足迹核算——以山东省高密地区为例

朱永昶, 李玉娥, 姜德锋, 邹晓霞

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 473–482 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0180>

稳定氮肥用量和施用方式对水稻产量和氮肥效率的影响

李敏, 叶舒娅, 刘枫, 郭熙盛, 武际, 黄义德, 郭肖颖

农业资源与环境学报. 2015(6): 559–564 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0157>

应用于水稻生产的增效减负环保型施肥技术比对——以宁夏引黄灌区为例

张爱平, 高霁, 刘汝亮, 陈哲, 杨世琦, 杨正礼, 张晴雯

农业资源与环境学报. 2015(2): 175–184 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0334>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

穆 聪, 陈晓辉, 林伟杰, 等. 典型乌龙茶产区氮素平衡状况及减排潜力研究[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 186–194.

MU Cong, CHEN Xiao-hui, LIN Wei-jie, et al. Nitrogen balance status and greenhouse gas mitigation potential in typical Oolong tea production areas[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(2): 186–194.

典型乌龙茶产区氮素平衡状况及减排潜力研究

穆 聪^{1,2}, 陈晓辉^{1,2}, 林伟杰¹, 胡浩南³, 吴良泉^{1,2*}

(1. 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002; 2. 福建农林大学国际镁营养研究所, 福州 350002; 3. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058)

摘 要:为探讨典型乌龙茶产区氮素平衡状况及温室气体减排潜力,基于2015—2017年在福建省安溪县和武夷山市茶园开展的355户农户调研数据和207个土壤数据,采用Boundary line方法,分析了典型乌龙茶产区的氮肥施用特征、氮素平衡状况以及温室气体减排潜力。结果表明:安溪县茶园平均氮肥投入量 $509.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,主要来源于复合肥和尿素,全年氮盈余量 $479.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;武夷山市茶园平均氮肥投入量 $218.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,主要来源于复合肥,全年氮盈余量 $189.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;氮素投入与氮养分盈余量之间具有极显著的正相关关系;随着氮素盈余量的增加,土壤全氮含量也随之增加,并且安溪茶园的土壤全氮含量比武夷山茶园更高;基于Boundary line方法,安溪县和武夷山市茶园的氮肥优化用量分别为 $411.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $157.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;通过优化氮肥投入和管理水平可分别实现安溪县和武夷山市茶园温室气体减排62.0%和68.0%。在安溪县和武夷山市乌龙茶产区中,氮肥施用严重过量,导致氮素盈余量和温室气体排放量较高,应通过优化氮肥用量达到减少氮素过量盈余和降低茶园温室气体排放的目的。

关键词:乌龙茶;氮肥优化用量;氮素平衡;温室气体减排

中图分类号:S143.1

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)02-0186-09

doi: 10.13254/j.jare.2019.0068

Nitrogen balance status and greenhouse gas mitigation potential in typical Oolong tea production areas

MU Cong^{1,2}, CHEN Xiao-hui^{1,2}, LIN Wei-jie¹, HU Hao-nan³, WU Liang-quan^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. International Magnesium Institute, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Farmer and soil surveys were conducted to explore the nitrogen balance and greenhouse gas emission reduction potential in typical Oolong tea gardens. Based on the Boundary line approach, survey data from 355 farmers and 207 soil tests in tea gardens of Anxi County and Wuyishan City in Fujian Province from 2015 to 2017 were collected to analyze the characteristics of nitrogen fertilizer application, nitrogen balance, and greenhouse gas emission reduction potential. The results showed that the average amount of nitrogen fertilizer input in Anxi County tea gardens was $509.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, mainly from compound fertilizer and urea, and the annual nitrogen surplus was $479.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. The average amount of nitrogen fertilizer input in tea gardens in Wuyishan City was $218.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, mostly from compound fertilizer, and the annual nitrogen surplus was $189.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. There was a significant positive correlation between nitrogen input and nitrogen nutrient surplus. With the increase of nitrogen surplus, soil total nitrogen content also increased, and the total nitrogen content of tea gardens in Anxi County was higher than that in Wuyishan City. Based on the Boundary line method, the optimal nitrogen fertilizer application rate in tea gardens of Anxi County and Wuyishan City was $411.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $157.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. The greenhouse gas emission could be reduced by 62.0% and 68.0% respectively by optimizing the input and management level of nitrogen fertilizer. This study demonstrated that

收稿日期:2019-02-10 录用日期:2019-04-18

作者简介:穆 聪(1993—),男,贵州毕节人,硕士研究生,从事养分资源管理研究。E-mail: 1211400864@qq.com

*通信作者:吴良泉 E-mail: liangquan01@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0200400, 2016YFD0200401);国家自然科学基金青年科学基金项目(31501832)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2016YFD0200400, 2016YFD0200401); The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(31501832)

excessive application of nitrogen fertilizer led to high surplus of nitrogen in the Oolong tea gardens of Anxi County and Wuyishan City in Fujian Province. The amount of nitrogen fertilizer should be optimized to reduce excessive surplus of nitrogen and reduce greenhouse gas emissions from tea garden.

Keywords: Oolong tea; optimum nitrogen rate; nitrogen balance; greenhouse gas mitigation

茶树是我国南方主要的经济作物之一,近十年来我国茶园面积接近翻番。化肥的投入,尤其是氮肥的投入,在茶叶产量和品质形成中起关键作用。然而,盲目过量施用氮肥的问题也比较突出^[1],如马立锋等^[2]对浙江省绿茶主产区的434户茶农施肥情况调查表明,氮肥平均用量为521 kg N·hm⁻²,远高于当前专家的推荐用量300~450 kg N·hm⁻²。过量的氮肥施用不仅不会进一步增加产量,反而会导致氮肥在土壤中的残留量或损失量明显增加^[3],对气候、土壤和水体质量造成不良影响^[4]。氮素平衡是氮素管理和政策制定的有效指标,在农田、农场、区域尺度上被广泛用以指示氮素管理水平和环境影响程度^[5]。因而,明确茶园生态系统的氮素平衡,有助于理解氮素循环、效率及环境影响,对于实现氮肥的合理施用具有重要意义。

氮肥的过量施用带来的环境问题较为突出,如温室效应、土壤酸化和水体富营养化等,因而减少区域作物系统氮肥过量施用带来的环境代价是当前农业面临的重大挑战^[6-8]。优化区域氮肥用量对于提高氮肥效率和减少环境代价具有重要意义。国内外关于推荐氮肥用量的方法已有大量的研究,一类是以土壤、植株测试等为主的确立适宜施氮量的方法,如针对我国北方的玉米和小麦,已经建立基于根层土壤氮素实时监测的方法以实现土壤、环境氮素供应和氮肥投入与作物吸收的匹配,最大限度实现作物的高产与环境保护协调^[9];另一类是基于田间试验,通过氮肥肥效反应数据应用数学模型模拟田块的氮肥适宜施用量的方法^[10]。然而,这两种方法都需要频繁的土壤测试或开展规范的田间试验,需要耗费大量财力和物力,并受时效性的影响,因而难以被广泛采纳。1972年Webb在研究多种生物学因素对作物生产力的影响时,提出了Boundary line(边界线)的方法^[11]。Webb认为生物学材料在给定的环境下总是有一个发展或者响应的上限,因此在多数条件下,对于给定环境下自变量的每一个水平,因变量都会有一个最大的响应值,即最佳表现,当数据样本足够时,一条由每个自变量水平对应的最佳表现点构成的线就会出现。由于

这条线出现在数据体的边上,因此将其命名为边界线。由于该方法可以基于大样本农户、土壤、植株调查的数据建立不同因素与产量之间的关系,大幅缩短时间并减少人力和物力的投入。该方法被广泛应用于分析土壤、植物养分、施肥、栽培因子和气候条件等对产量的影响^[12-15]。然而,将Boundary line方法用于茶叶产区的氮肥推荐鲜见报道。

本研究通过实地调研的方法,对福建省安溪县、武夷山市两大乌龙茶典型产区的氮素平衡状况进行了研究,并基于Boundary line方法计算了区域优化施氮量,评价了两个区域氮肥施用的温室气体排放强度及减排潜力。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

安溪县地处东经117°36'~118°17'、北纬24°50'~25°26',年均温19~21℃,年降水量为1800 mm,是我国铁观音茶叶生产第一大产区;武夷山市地处东经117°37'~118°19'、北纬27°27'~28°04',年均温18.3℃,年降雨量1900 mm,是我国岩茶主要产区。研究区域及农户调研地点如图1所示。

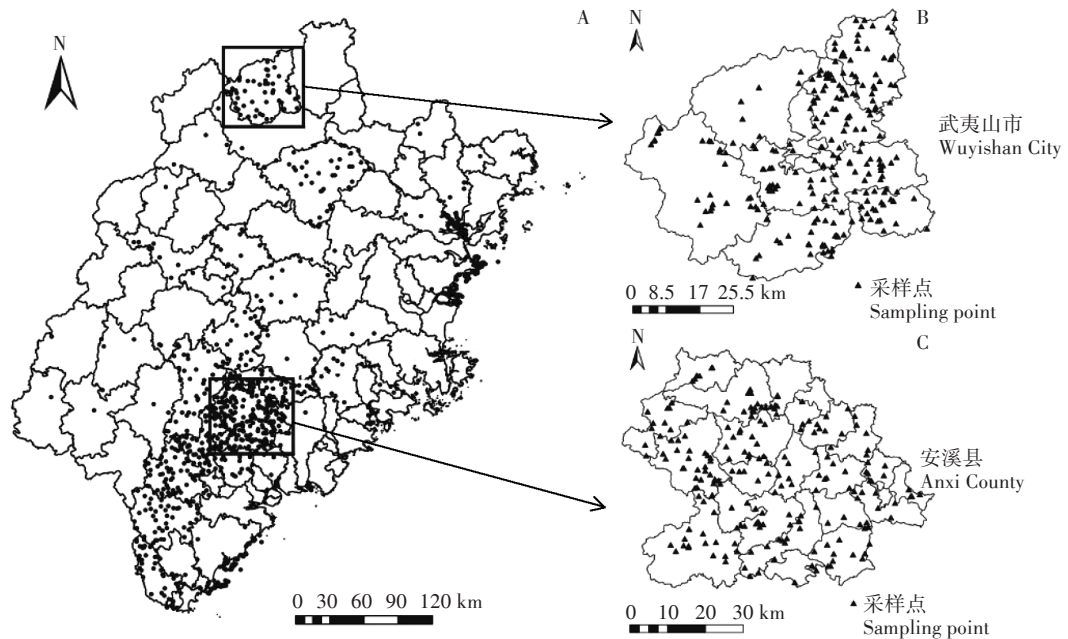
1.2 土壤全氮状况

在选定的茶园地块内,采用“S”形、随机、等量、多点混合进行布点采样的方法,在地形变化小、地力较均匀、采样单元面积较小的情况下,采用“梅花”形布点采样,并避开路边、田埂、沟边、施肥点等特殊部位。取样深度分别为0~20、20~40、40~60 cm,将每个土层土壤混合成一个样。按照此方法,于2015年7月、2016年7月和2017年5月分别在安溪县和武夷山市采集了110个和97个样品。

土壤全氮含量采用Elementar vario max cube元素分析仪(德国)进行分析测定^[16]。

1.3 氮肥施用状况及氮素平衡状况

基于农户调研,分析了2015—2017年间安溪191户农户和武夷山164户农户茶园的氮肥投入情况,主要包括茶树的品种、树龄、种植面积及产量水平,肥料种类及其养分含量,每个茶季氮肥施用量等。



图A中黑点代表乌龙茶产量,1个点代表250 t
The black dots in Figure A represent the yield of Oolong tea, one dot represent 250 t

图1 研究区域及土壤取样点分布

Figure 1 Location of the study region and distribution of soil sampling

氮素平衡的计算方法:氮素平衡=(化肥氮+有机肥氮+沉降氮) - 茶叶采摘氮素带走量。

化肥养分含量根据农户所施肥料包装袋上所标示的养分含量计算;有机肥料的养分含量根据《中国肥料实用手册》和《中国有机肥料资源》的参数汇总计算(表1);化肥和有机肥输入的氮素按照农户调查点的施用量与其相应含氮量计算;氮素沉降根据李文卿等^[17]和刘尔平等^[18]研究得到的大气氮素混合沉降平均值(15.9 kg·hm⁻²)进行计算;茶叶采摘氮素带走量=茶青产量÷4.5(茶青转茶干系数)×茶叶氮含量。茶叶氮含量采用本课题组大样本调研的测定结果,安溪县和武夷山市茶叶氮含量分别为19.6 mg·kg⁻¹和18.4 mg·kg⁻¹。

表1 各种有机肥氮养分含量

Table 1 Nitrogen nutrient content of different manures

有机肥种类 Manure types	氮含量 N content/%
猪粪 Pig manure	0.55
羊粪 Sheep manure	0.78
牛粪 Cattle manure	0.38
鸡粪 Chicken manure	1.03

1.4 氮肥优化用量

本研究运用Boundary line方法计算氮肥投入量与茶叶产量潜力之间的关系。边界线生成的第一步是找出两个变量之间的边界点,计算过程参照陈广锋^[20]的方法。通过SAS Version 9.1.3软件模拟氮肥投入量与茶叶产量的边界值之间的关系,选用二次曲线模型、二次曲线+平台模型和线性+平台模型进行拟合,选取决定系数(R²)最大的趋势线作为边界线。

1.5 温室气体效应

本研究的系统边界是茶园氮肥在生产、运输和施用过程中所带入的温室气体排放量,其计算公式为:

$$GHG=(GHG_m+GHG_t) \times N_r + N_2O_{总} \times 44/28 \times 298$$

$$N_2O_{总} = N_2O_{直接} + 1\% \times NH_3_{挥发} + 0.75\% \times NO_3^{-}_{淋洗}$$

式中:GHG为总温室气体排放量,kg CO₂-eq·hm⁻²;GHG_m和GHG_t分别为氮肥生产和运输过程中温室气体排放因子,kg CO₂-eq·kg⁻¹N。在本研究中,采用Zhang等^[6]的研究结果,GHG_m为8.2 kg CO₂-eq·kg⁻¹N, GHG_t为0.08 kg CO₂-eq·kg⁻¹N(表2)。N_r指氮肥施用量,kg N·hm⁻²。N₂O排放包括直接N₂O排放和间接N₂O排放,直接排放量N₂O_{直接}(kg N·hm⁻²)=2.82%×N_r^[21];间接N₂O排放根据IPCC(International Panel on Climate Change)给出的国家温室气体清单指南的结

果,通过 NH_3 挥发和 NO_3^- 淋洗的间接排放因子来估算 N_2O 的间接排放,二者间接排放因子的缺省值分别为1%和0.75%^[7]。 NH_3 挥发($\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$)= $11.53\%\times\text{Nr}^{[22]}$, NO_3^- 淋洗($\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$)= $13.1\%\times\text{Nr}^{[23-24]}$ 。

1.6 数据处理

试验数据采用SPSS 21、Excel 2016软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 茶园氮肥投入状况分析

安溪县和武夷山市茶园的氮肥年平均用量分别为 $509.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $218.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,二者存在显著差异(图2a)。将氮肥用量划分为4个等级(≤ 150 、 $150\sim$

300 、 $300\sim 450\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $\geq 450\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),计算每个等级下氮肥用量的样本百分比,进一步了解目前氮肥用量的样本分布频率。从频率分布图(图2b)来看,安溪县茶园施氮量处在 $\geq 450\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的样本比例最高,而武夷山茶园则主要分布在 $150\sim 300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间。

如表3所示,安溪县茶园平均氮肥投入量为 $509.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,氮素主要来源于尿素和复合肥,分别为 $190.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $293.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,各占氮肥总量的37.5%和57.6%,仅少部分来源于有机肥($9.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),占1.8%;武夷山市平均氮肥投入量为 $218.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,主要以复合肥为主($189.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),占施肥总量的86.8%,少部分来源于有机肥($12.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),占5.9%,尿素则几乎没有农户施用。

2.2 氮肥投入与产量关系

基于Boundary line方法模拟氮肥用量与产量关系(图3和图4),结果表明,安溪县茶园的年施氮量为 $411.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,茶青产量达到最大值14.1 t;武夷山市茶园氮肥施用量与茶青产量呈线性加平台趋势,当氮肥用量小于 $157.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,茶青产量随着氮肥施用的增加而增加,当氮肥用量超过 $157.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时茶青产量不再增加。

不同茶季间的氮肥效应也表现出明显差异(图4),安溪县春茶的优化施氮量为 $40.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,秋茶的

表2 氮肥生产和运输过程中温室气体排放因子

Table 2 Greenhouse gas (GHG) emission factors of N fertilizer production and transportation

投入 Input	单位 Unit	温室气体排放量 GHG emission amount ($\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ N}$)			
		CO_2	CH_4	N_2O	总量 Total
氮肥生产 N fertilizer production	kg N	7.61	0.56	0.03	8.20
氮肥运输 N fertilizer transportation	kg N	0.08	0	0	0.08

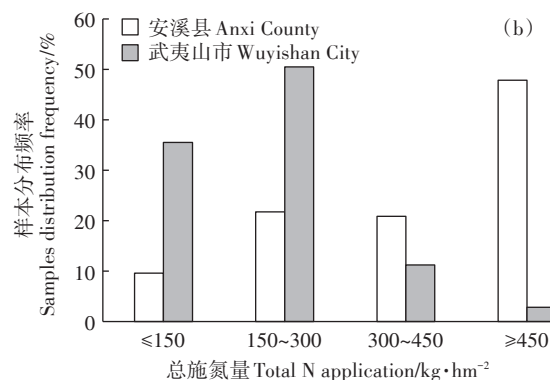
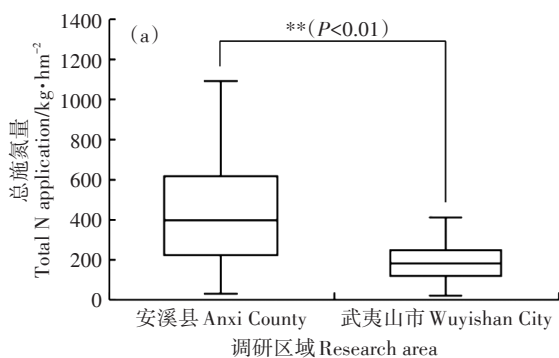


图2 安溪县和武夷山市茶园氮肥投入状况(a)和样本频率分布(b)

Figure 2 Total N application(a) and samples distribution frequency(b) of tea gardens in Anxi County and Wuyishan City

表3 安溪县和武夷山市茶园氮素来源及茶叶氮素带走量

Table 3 The application structure of nitrogen fertilizer and yield of tea gardens in Anxi County and Wuyishan City

地区 Region	氮素来源 N source/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$				茶青产量 Yield/ $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	氮素带走量 N output/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
	尿素 Urea	复合肥 Compound fertilizer	有机肥 Manure	氮沉降 Deposition		
安溪县 Anxi County	190.9 ± 310.0	293.4 ± 250.8	9.2 ± 31.6	15.9	7.0 ± 3.2	30.4 ± 14.2
武夷山市 Wuyishan City	0	189.3 ± 111.8	12.9 ± 33.7	15.9	6.9 ± 5.8	28.3 ± 23.9

优化施氮量为 $320.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 表明生产秋茶比生产春茶需要投入更高量的氮肥。

2.3 氮素平衡状况分析

茶园氮素盈余量与氮肥用量密切相关, 两者呈极显著的相关性(图5), 说明氮素平衡主要受到氮肥用量的影响。

由于两地氮素投入量的差异, 安溪茶园氮素平均盈余量 ($479.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 远远大于武夷山市茶园 ($189.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。对茶园氮素盈余量进行分组表明(表4), 安溪县氮素盈余量主要分布在 $\geq 400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的区间上, 占47.3%, 武夷山市主要分布在 $100 \sim 200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的范围, 占35.1%。

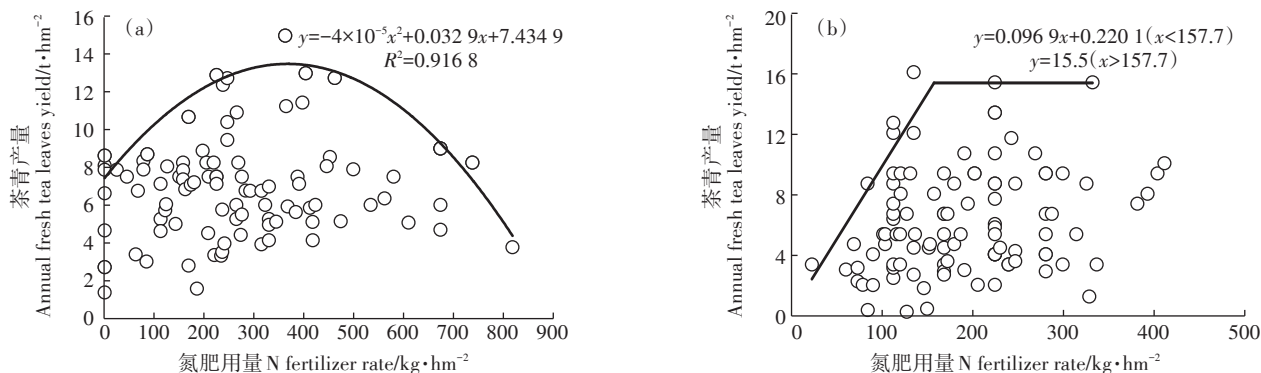


图3 安溪县(a)与武夷山市(b)茶园全年氮肥用量与产量的关系

Figure 3 The relationship between N rate and annual fresh tea leaves yield in Anxi County (a) and Wuyishan City (b)

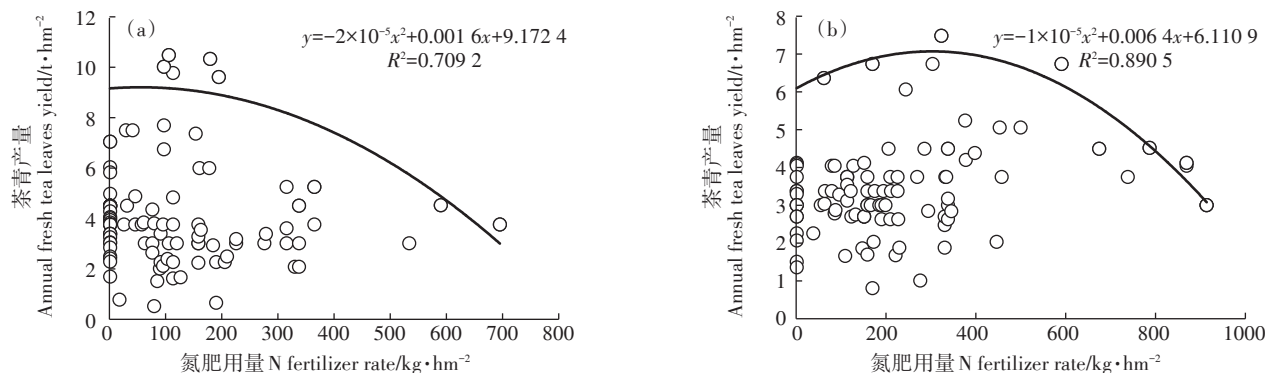


图4 安溪县氮肥施用量与春茶(a)、秋茶(b)茶青产量的关系

Figure 4 The relationship between N rate and spring(a)-autumn(b) fresh tea leaves yield in Anxi County

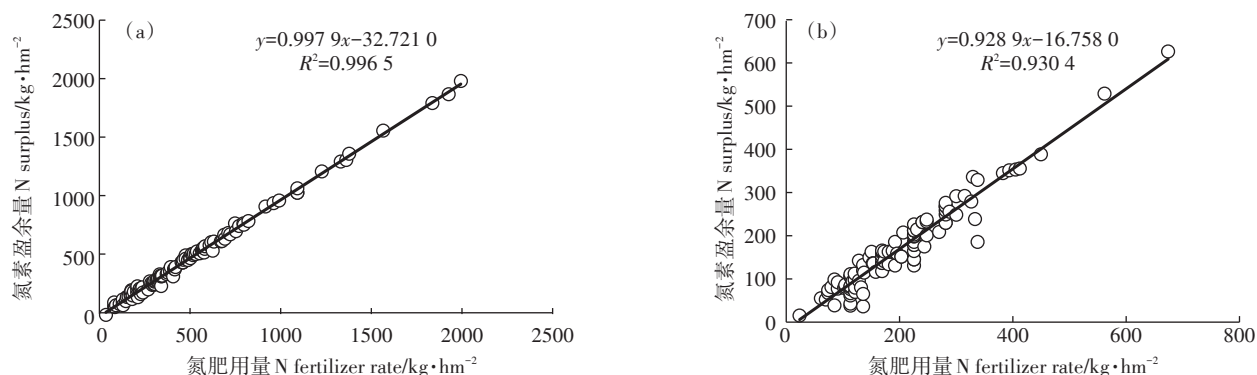


图5 安溪县(a)和武夷山市(b)茶园生产体系氮盈余与氮肥投入的关系

Figure 5 The relationship between nitrogen surplus and N fertilizer rate of tea gardens in Anxi County (a) and Wuyishan City (b)

2.4 氮素盈余对土壤全氮的影响

如图6a所示,随着氮素盈余量的增加,表层土壤(0~20 cm)全氮含量也随之增加,并且安溪茶园的土壤全氮含量均比武夷山茶园高,这可能与安溪茶园的氮肥施用量比武夷山茶园更高有关。此外,在不同土层上,安溪县茶园土壤的全氮含量也均比武夷山茶园高(图6b),在土层深度为0~20 cm和40~60 cm处安溪全氮含量较武夷山分别高出83%和116%,而在20~40 cm处仅高出28%,这可能与武夷山茶园大多采用开沟深施有关,因而20~40 cm土层的全氮含量差距较小。

2.5 温室气体减排潜力

基于Boundary line方法得到的优化氮肥用量及产量潜力(图3和图4),对温室气体排放潜力进行估算。如表5所示,在安溪县乌龙茶产区,与农民施氮量 $526.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 相比,氮肥优化用量可以降为 406.0

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,减少氮肥投入22.9%,同时茶叶产量有所提高,单位产量的温室气体排放强度降低62.0%(从 $1705.2 \text{ kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{t}^{-1}$ 降为 $647.5 \text{ kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{t}^{-1}$);在武夷山市茶园生产区,与农民施氮量 $202.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 相比,氮肥优化用量($158.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)可以减少氮肥用量21.9%,同时茶叶产量仍有提高,单位产量的温室气体排放强度降低68.0%(从 $717.1 \text{ kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{t}^{-1}$ 降为 $229.2 \text{ kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{t}^{-1}$)。

3 讨论

本研究表明,安溪县和武夷山市茶园的氮素年平均投入量分别为 509.4 、 $218.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,安溪茶园氮素投入量略高于阮建云等^[1]1998—1999年的研究结果($439 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。而基于Boundary line方法获得的优化施氮量分别为 411.3 、 $157.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。安溪县茶园氮肥的年施用总量和优化施氮量均远高于武夷山市,

表4 安溪县和武夷山市茶园氮素盈余情况

Table 4 N surplus status of tea gardens in Anxi County and Wuyishan City

地区 Region	氮盈余分级 N surplus classification/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	样本量(<i>n</i>) Samples	样本分布频率 Samples distribution frequency/%	氮素盈余量 N Surplus/ $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$
安溪县 Anxi County	≤100	6	5.4	60.1
	100~200	19	17.3	158.6
	200~300	14	12.7	247.5
	300~400	19	17.3	337.9
	≥400	52	47.3	758.4
平均 Average				479.1
武夷山市 Wuyishan City	≤100	20	20.5	76.5
	100~200	34	35.1	148.5
	200~300	31	32.0	242.2
	300~400	9	9.3	351.1
	≥400	3	3.1	542.6
平均 Average				189.8

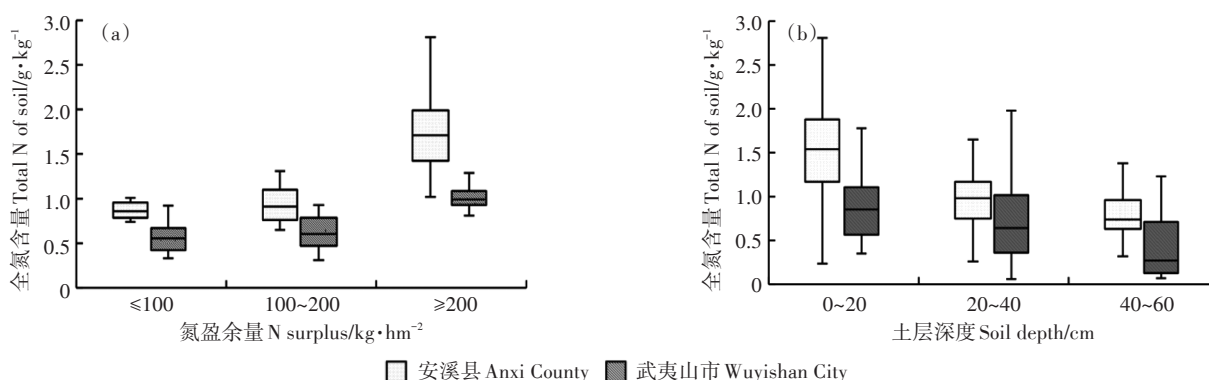


图6 安溪县和武夷山市茶园氮盈余量与土壤全氮含量关系(a)和不同土层中全氮的含量分布特征(b)

Figure 6 The relationship between N surplus and soil total N (a) and the distribution characteristics of total N in different soil layers (b) of tea gardens in Anxi County and Wuyishan City

表5 安溪县和武夷山市茶园氮肥用量优化及温室气体减排潜力

Table 5 Optimization of nitrogen fertilizer use and greenhouse gas (GHG) emission mitigation potential of tea gardens in Anxi County and Wuyishan City

地区 Region	施肥处理 Treatment	产量 Yield/t·hm ⁻²	氮肥用量 N rate/ kg·hm ⁻²	温室气体排放量 GHG emission amount/kg CO ₂ -eq·hm ⁻²			总计 Total	温室气体排放强度 GHG emission intensity/ kg CO ₂ -eq·t ⁻¹
				生产过程 Production process	运输过程 Transportation process	施用过程 Application process		
安溪县 Anxi County	习惯施肥 Famers' practice	6.9	526.3	4 315.7	42.1	7 476.5	11 834.3	1 705.2
	优化施肥 Optimal N rate	14.1	406.0	3 329.2	32.5	5 767.5	9 129.2	647.5
	差值 Difference	7.2	120.3	986.5	9.6	1 709.0	2 705.1	1 057.7
武夷山市 Wuyishan City	习惯施肥 Famers' practice	6.3	202.2	1 658.0	16.2	2 872.4	4 546.6	717.1
	优化施肥 Optimal N rate	15.5	158.0	1 295.6	12.6	2 244.5	3 552.7	229.2
	差值 Difference	9.2	44.2	362.4	3.6	627.9	993.9	487.9

可能主要是由于安溪茶园采摘次数较多,一般多采1次秋茶,使得施肥次数也比武夷山茶园多1~2次。本研究结果表明,秋季施氮量高于春季施氮量,这可能是由于秋季降雨量比较集中^[25],茶园径流量和淋洗量大,导致需要更多的氮肥投入^[26]。本研究中安溪茶园的优化施氮量略高于游小妹等^[27]通过田间试验和基于肥料效应函数法^[28]获得的结果(分别为337.5 kg·hm⁻²和376 kg·hm⁻²),这可能是由于田间试验中施肥方式为开沟覆土施用,而安溪茶园氮肥主要以撒施为主,氮肥的利用率较低。因而,基于Boundary line方法获得的优化施氮量反映的是当前农户施肥管理方式下的产量最佳的适宜推荐用量,将来通过施肥方式的改进仍有一定的减肥空间。在当前土壤或植株氮测试仍未广泛普及的情况下,基于Boundary line的方法建立区域优化用量可以为当地农业技术人员指导农业生产提供有效依据^[29]。

茶园氮肥投入量超出茶树实际需求是导致茶园氮盈余量增加和表层土氮素富集的主要原因,施氮量与氮养分盈余之间具有极显著正相关关系,氮肥的过量施用造成了茶园氮盈余、土壤氮素富集(图5、图6)。本研究中,安溪茶园氮素平均盈余量(479.1 kg·hm⁻²)和武夷山市茶园平均盈余量(189.8 kg·hm⁻²)都已经远远超过了荷兰MINAS(Mineral Accounting System)设定的黏壤耕地土壤的限量指标100 kg·hm⁻²^[30]。茶园生态系统中氮持续盈余会增加系统内养分流失和淋失的风险,从而对地表和地下水体的水质造成潜在的威胁^[31]。尽管将过高的习惯施肥量降低到基于Boundary line方法建立的优化施肥量可以部分降低氮素的损失,但仍远远高于茶叶采摘部分氮素带走量(28.3~30.4 kg·hm⁻²),在优化施肥量范围内,产量目标

和环境目标仍很难协调。因而在茶园的栽培体系下,改进现有施肥方式并进行施肥环境学的研究,将茶树氮肥施用的产量效益和环境效益有机结合起来显得非常必要。

农业是温室气体的主要排放源之一,本研究中安溪县和武夷山市茶区由于氮肥投入导致的温室气体排放量分别为11 834.3、4 546.6 kg CO₂-eq·hm⁻²,明显高于我国玉米和小麦等粮食作物的排放量^[7],也高于辣椒生产中的温室气体排放量^[8],这些差异主要是由乌龙茶生产体系高氮肥投入导致。比如,本研究中安溪县茶园的氮肥用量(509.4 kg·hm⁻²)是武良^[7]研究中小麦的氮肥用量(210 kg·hm⁻²)的2.42倍,导致本研究中茶园生产体系温室气体排放量是我国小麦温室气体排放量的3.83倍。本研究中安溪乌龙茶产区的温室气体排放量显著高于武夷山茶区,这与其氮肥投入量的差异直接相关,与前人研究结果^[32-33]一致,温室气体的排放量随着氮肥用量的增加而显著增加。因而,合理控制氮肥的用量是减少温室气体排放的有效途径,同时应根据区域的差异进行科学管理。本研究表明,在安溪乌龙茶产区,通过优化区域氮肥投入和提高管理水平,可以减少氮肥投入22.9%,降低温室气体排放强度62.0%;在武夷山茶园生产区,氮肥用量可以减少21.9%,温室气体排放强度可降低68.0%。将来通过新型氮肥品种的替代,如包膜尿素或添加生物转化抑制剂的稳定性氮肥的应用,将可以进一步减少氮素损失,提高氮肥利用率和减少温室气体的排放量^[34-35]。由于本研究温室气体排放结果是基于模型模拟获得,具有一定的不确定性,将来需要通过实测以进一步明确。综上所述,安溪县和武夷山市乌龙茶产区氮肥均存在不同程度的过量施用,造成茶园氮素

明显盈余,应优化氮肥投入,提高管理水平,减少乌龙茶产区氮素过量盈余和温室气体排放压力,实现可持续发展。

4 结论

(1)安溪县和武夷山市茶园的氮素年平均投入量分别为 509.4、218.1 kg·hm⁻²,与 Boundary line 方法获得的优化施氮量(分别为 411.3、157.7 kg·hm⁻²)相比,安溪县和武夷山市茶园减肥比例可分别达到 19.3%和 27.7%。

(2)安溪县和武夷山市茶园氮素平均盈余量分别为 479.1 和 189.8 kg·hm⁻²,茶园氮肥投入量超出茶树的实际需求量,导致茶园氮素盈余量较高和土壤氮含量升高。

(3)如果优化氮肥用量和提高管理水平,预计最大可以实现安溪县和武夷山市茶区温室气体排放量分别减少 62.0%和 68.0%。

参考文献:

- [1] 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]. 中国土壤与肥料, 2001(5):9-13.
RUAN Jian-yun, WU Xun, SHI Yuan-zhi, et al. The nutrient input and the effect of fertilization in the typical tea areas of China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2001(5):9-13.
- [2] 马立锋,陈红金,单英杰,等. 浙江省绿茶主产区茶园施肥现状及建议[J]. 茶叶科学, 2013(1):74-84.
MA Li-feng, CHEN Hong-jin, SHAN Ying-jie, et al. Status and suggestions of tea garden fertilization on main green tea-producing counties in Zhejiang Province[J]. *Journal of Tea Science*, 2013(1):74-84.
- [3] 巨晓棠. 氮肥有效率的观念及意义——兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J]. 土壤学报, 2014, 51(5):921-933.
JU Xiao-tang. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio: Discussing misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(5):921-933.
- [4] Mclellan E L, Cassman K G, Eagle A J, et al. The nitrogen balancing act: Tracking the environmental performance of food production[J]. *Bio-science*, 2018, 68(3):194-203.
- [5] 巨晓棠,谷保静. 氮素管理的指标[J]. 土壤学报, 2017, 54(2):281-296.
JU Xiao-tang, GU Bao-jing. Indexes of nitrogen management[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2):281-296.
- [6] Zhang W F, Dou Z X, He P, et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(21):8375-8380.
- [7] 武 良. 基于总量控制的中国农业氮肥需求及温室气体减排潜力研究[D]. 北京:中国农业大学, 2014.
WU Liang. Nitrogen fertilizer demand and greenhouse gas mitigation potential under nitrogen limiting conditions for Chinese agriculture production[D]. Beijing:China Agricultural University, 2014.
- [8] 王孝忠. 我国蔬菜生产的环境代价、减排潜力与调控途径[D]. 北京:中国农业大学, 2018.
WANG Xiao-zhong. Environmental impacts, mitigation potentials and management approaches in Chinese vegetable production system: Pepper as a case[D]. Beijing:China Agricultural University, 2018.
- [9] Chen X, Zhang F, Römheld V, et al. Synchronizing N supply from soil and fertilizer and N demand of winter wheat by an improved Nmin method[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 74(2):91-98.
- [10] 朱兆良. 推荐氮肥适宜施用量的方法论刍议[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1):1-4.
ZHU Zhao-liang. On the methodology of recommendation for the application rate of chemical fertilizer nitrogen to crops[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(1):1-4.
- [11] Webb R A. Use of the boundary line in the analysis of biological data [J]. *Journal of Horticultural Science*, 1972, 47(3):309-319.
- [12] Elliott J A, De Jong E. Prediction of field denitrification rates: A Boundary-Line approach[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57:82-87.
- [13] Ewald S, Jürgen H, Fares A. Establishing critical values for soil and plant analysis by means of the boundary line development system (bolides) [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1996, 27(13/14):2739-2748.
- [14] Amir H, Afshin S, Ebrahim Z, et al. Using boundary line analysis to assess the on-farm crop yield gap of wheat[J]. *Field Crops Research*, 2018, 225:64-73.
- [15] Wang N, Jassogne L, Van Asten P J A, et al. Evaluating coffee yield gaps and important biotic, abiotic, and management factors limiting coffee production in Uganda[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 63:1-11.
- [16] 侯敏娜,杨 博,钟 声. Vario MACRO cube 型元素分析仪测定化肥中总氮含量[J]. 广东化工, 2015, 42(6):177-178.
HOU Min-na, YANG Bo, ZHONG Sheng. Determination of nitrogen content in fertilizer by vario MACRO cube element analyzer[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2015, 42(6):177-178.
- [17] 李文卿,陈顺辉,张 颖,等. 福建烤烟种植区大气氮素湿沉降研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(31):215-220.
LI Wen-qing, CHEN Shun-hui, ZHANG Ying, et al. Study on atmospheric nitrogen wet deposition in Fujian tobacco planting area[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(31):215-220.
- [18] 刘尔平,刘桂生,雷俊杰. 闽北果园生态系统大气氮湿沉降研究 [J]. 江西农业学报, 2012, 24(7):115-117.
LIU Er-ping, LIU Gui-sheng, LEI Jun-jie. Study on wet deposition of atmospheric nitrogen in orchard ecosystem of northern Fujian[J]. *Acta Agricultura Jiangxi*, 2012, 24(7):115-117.
- [19] Sun L L, Liu Y, Wu L Q, et al. Comprehensive analysis revealed the close relationship between N/P/K status and secondary metabolites in tea leaves[J]. *ACS Omega*, 2019(4):176-184.
- [20] 陈广锋. 华北平原小农户小麦/玉米高产高效限制因素及优化体系设计研究[D]. 北京:中国农业大学, 2018.

- CHEN Guang-feng. Limiting factors analysis and designing for high yield and high nutrient use efficiency for winter wheat and summer maize in smallholder farmers fields in the North China Plain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.
- [21] 王峰, 陈玉真, 尤志明, 等. 茶园土壤氮含量、施氮效应及其 N_2O 排放的研究进展[J]. 福建农业学报, 2014, 29(10): 1045-1050.
WANG Feng, CHEN Yu-zhen, YOU Zhi-ming, et al. Nitrogen content, response to nitrogen fertilization and N_2O emission of soil at tea plantations[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 29(10): 1045-1050.
- [22] 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.
- [23] Xu S J, Zhou S N, Ma S L, et al. Manipulation of nitrogen leaching from tea field soil using a *Trichoderma viride* biofertilizer[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(36): 27833-27842.
- [24] 何石福, 荣湘民, 李艳, 等. 有机肥替代和稻草覆盖对中南丘陵茶园氮磷径流损失的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 120-126.
HE Shi-fu, RONG Xiang-min, LI Yan, et al. Effects of organic manure substitution and straw mulching on nitrogen and phosphorus runoff loss in effects of organic manure substitution and straw mulching on nitrogen and phosphorus runoff loss in Zhongnan hilly tea plantation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5): 120-126.
- [25] 国家气象科学数据中心. 中国地面累年值月值数据集[DB/OL]. [2019-02-10]. <http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/A.0029.0001.html>.
National Meteorological Information Center. China's ground year value monthly data set[DB/OL]. [2019-02-10]. <http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/A.0029.0001.html>.
- [26] 倪玉雪. 中国农田土壤硝态氮累积、淋洗与径流损失及 N_2O 排放[D]. 保定: 河北农业大学, 2013.
NI Yu-xue. Nitrate accumulation, leaching, runoff and N_2O emissions in agricultural soil of China[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2013.
- [27] 游小妹, 陈常颂, 钟秋生, 等. 不同用氮量水平对乌龙茶产量、品质的影响[J]. 福建农业学报, 2012, 27(8): 853-856.
YOU Xiao-mei, CHEN Chang-song, ZHONG Qiu-sheng, et al. Preliminary study on effects of nitrogen fertilization on yield and quality of oolong tea[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 27(8): 853-856.
- [28] 陈宗懋, 杨亚军. 中国茶经(2011修订版)[M]. 上海: 上海文化出版社, 2011: 422.
CHEN Zong-mao, YANG Ya-jun. Chinese tea classics (2011)[M]. Shanghai: Shanghai Culture Publishing House, 2011: 422.
- [29] 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(2/3): 117-127.
- [30] Oenema O, Kros H, De Vries W. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: Implications for nutrient management and environmental policies[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 20(1/2): 3-16.
- [31] 李新艳, 李恒鹏. 江西省陆地生态系统氮平衡的时空分布规律研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1320-1330.
LI Xin-yan, LI Heng-peng. Temporal and spatial changes of nitrogen mass balance in a terrestrial ecosystem of Jiangxi Province, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(6): 1320-1330.
- [32] Yan M, Cheng K, Luo T, et al. Carbon footprint of grain crop production in China: Based on farm survey data[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104: 130-138.
- [33] Yan P, Zhang Q, Shuai X F, et al. Interaction between plant density and nitrogen management strategy in improving maize yield and nitrogen use efficiency on the North China Plain[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2015, 154: 1-11.
- [34] Han W Y, Ma L F, Shi Y Z, et al. Nitrogen release dynamics and transformation of slow release fertilizer products and their effects on tea yield and quality[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2008, 88: 839-846.
- [35] Guo C, Ren T, Li P F, et al. Producing more grain yield of rice with less ammonia volatilization and greenhouse gases emission using slow-controlled-release urea[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26: 2569-2579.