



# 中国茶园土壤酸化现状与分析

颜鹏, 韩文炎, 李鑫, 张丽平, 张兰

(中国农业科学院茶叶研究所/农业农村部茶叶质量安全控制重点实验室, 杭州 310008)

**摘要:**【目的】茶树是我国重要的经济作物, 由于其较好的经济效益, 近年来茶树种植面积不断扩大, 但是土壤酸化问题也日益突出。对已发表的茶园土壤 pH 的文献进行整理和分析, 明确我国主要产茶省份茶园土壤 pH 情况, 为茶园土壤调控管理和茶园发展规划提供科学依据。【方法】以我国主要产茶区土壤酸化情况为研究对象, 筛选收集中国知网和 web of science 上 2000—2016 年发表的相关文献, 利用加权平均的方法计算全国以及各产茶省份茶园土壤平均 pH, 以及在各个区间的分布情况。利用文献数据, 比较茶园和周边森林土壤 pH 的差异。同时利用测土配方施肥数据, 对安溪县和松阳县两个典型产茶县不同作物类型下土壤 pH 进行比较分析。【结果】全国茶园土壤平均 pH 为 4.73, 各省份间存在很大差异。山东和河南两省茶园土壤 pH 超过 5.5, 分别达到 5.76 和 5.54, 江西省茶园土壤 pH 最低, 只有 3.86。从土壤 pH 在各区间的分布来看, 只有 41% 的茶园的土壤 pH 在 4.5—5.5 这一最适宜茶树生长的范围。高达 52% 的茶园的土壤 pH 在 4.5 以下, 属于不适宜茶树生长的强酸性土壤。与森林相比较, 种植茶树显著降低了土壤 pH。种茶历史悠久的安溪县茶园土壤 pH 为 4.2, 远低于水稻土壤的 5.2 和果蔬等土壤的 6.2。在种茶历史相对较短的松阳县, 茶园土壤 pH 为 5.1, 也分别低于水稻和果蔬等土壤的 5.2 和 5.4。【结论】我国茶园土壤酸化严重, 全国茶园土壤平均 pH 为 4.73, 超过 52% 的土壤的 pH 在 4.5 以下, 属于不适宜茶树生长的强酸性土壤。后期应当加强茶园土壤酸化调控, 以防止茶园土壤继续酸化, 实现茶叶长期可持续发展。

**关键词:** 茶园; 土壤酸化; 土地利用方式; 中国

## Present Situation and Analysis of Soil Acidification in Chinese Tea Garden

YAN Peng, HAN WenYan, LI Xin, ZHANG LiPing, ZHANG Lan

(Tea Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Tea Quality and Safety Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310008)

**Abstract:** 【Objective】Tea is an important economic crop in China. Because of its high economic value, its planting area has been expanding rapidly in the past years. However, the soil acidification is more and more serious. Understanding the soil acidification of tea gardens in the main tea planting provinces in China will be useful for guiding soil management and tea development in future. 【Method】To achieve our objective, 99 papers published in Chinese magazine Network and web of science were collected and the data about soil pH and its distribution in there interval of  $<4.5$ ,  $4.5-5.5$  and  $>5.5$  were analyzed by weighted average method. We further compared the soil pH between forest and tea garden to understand the effect of tea cultivation on soil acidification. And depending on the data from National Soil Testing and Formula Fertilizing Project, the soil pH with different crops were also analyzed in Songyang and Anxi countries, which were two representative tea planting countries. 【Result】The

收稿日期: 2019-05-24; 接受日期: 2019-07-03

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2017YFE0107500)和中国农业科学院科技创新工程(CAAS-XTX2016015)

联系方式: 颜鹏, E-mail: yanpengzn@163.com. 通信作者韩文炎, Tel: 0571-86650413; E-mail: hanwy@mail.tricaas.com

averaged soil pH of the whole county was 4.73, while it was various among different provinces. The averaged soil pH of Shandong and Henan were above 5.5, which were 5.76 and 5.54, respectively. While the averaged soil pH of Jiangxi was as low as 3.86. As for the percentage of averaged soil pH distribution in the interval of  $<4.5$ ,  $4.5-5.5$  and  $>5.5$ , only 41% soil pH were in the interval of  $4.5-5.5$ , which was suitable for tea growth. 52% sites were in the interval of  $\text{pH}<4.5$ , which was too low for tea growth. Depending on the data from 22 literatures, the soil pH of tea garden was 4.28, which was significantly lower than that 5.17 of forest. In Anxi, the country with long history of tea plantation, the soil pH of tea garden was 4.2, which was lower than that 5.2 and 6.2 of rice and fruit or vegetable soil. In Songyang, the country started to growth tea in the last two decades, the soil pH of tea garden was 5.1, this was also lower than that 5.2 and 5.4 of rice and fruit or vegetable soil. 【Conclusion】 Soil acidification was serious in our tea garden, the averaged soil pH was 4.73, and 52% of the tea garden with soil pH below 4.5, which was the critical value for tea growth. It is important to pay more attention on developing various technologies to ameliorate soil acidity in tea garden, and achieve its sustainable development in China.

**Key words:** tea; soil acidification; land use patterns; whole country

## 0 引言

【研究意义】茶树是我国重要的经济作物之一,尤其是近年来作为脱贫攻坚的重要抓手,受到越来越多的重视,茶树种植面积不断扩大。2017 年我国茶园采摘面积和茶叶总产量分别达到 305 万公顷和 268 万吨,占到全球的 45.9%和 35.5%<sup>[1]</sup>。在茶产业快速发展的同时,也面临着茶园土壤酸化越来越严重的问题,成为制约茶产业发展的一个重要因素<sup>[2-5]</sup>。土壤过酸会影响茶树养分吸收,从而影响茶树生长和茶叶品质<sup>[6-7]</sup>。另外,强酸性土壤下重金属有效性提高,茶树对重金属元素吸收量显著提高,从而造成安全隐患<sup>[8]</sup>。因此,掌握我国茶园土壤酸化现状,可为未来我国茶园土壤酸化分类调控对策的制订和重点区域土壤酸化的阻控提供依据。【前人研究进展】我国早在二十世纪七八十年代就有关于茶园土壤不断酸化的报道。1980 年孙继海和吴子铭报道贵州省桐子坡的土壤 pH 在种植茶树 10 年后由 5.2 降到 4.1<sup>[9]</sup>。中国科学院南京土壤研究所徐仁扣研究员课题组利用不同种植年限茶园,通过土壤 pH 变化和土壤缓冲容量,计算出植茶早期(0—13 年)茶园 0—20 cm 土层酸化速率高达  $4.4 \text{ kmol H}^+ \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[10]</sup>。云南大学李世玉对云南省不同种植年限茶园 0—120 cm 土层 pH 的研究发现,0—40 cm 土层 pH 呈提高趋势,40—80 cm 土层 pH 无变化,而 80—100 和 100—120 cm 土层呈酸化趋势<sup>[11]</sup>。我们前期研究发现,不仅茶园表层土壤酸化严重,在 100 cm 以下土层也存在严重的酸化问题<sup>[4]</sup>。这一阶段的研究主要集中在茶园土壤酸化速率方面,为了解茶园土壤酸化情况提供了很好的数据。2005 年启动全国测土配方施肥项目后,关于茶园土壤酸化方面的报道越来越多,而且涉及的调查研究范围也更广泛。张炳铃对福

建省安溪县茶园土壤 pH 的分析发现,土壤平均 pH 为 4.3,其中  $\text{pH}<4.5$  的占 70.0%<sup>[12]</sup>。这一阶段的研究多是在县域尺度上研究茶园土壤酸化情况,对指导当地茶园土壤调控起到了积极的指导作用。但是尚缺乏从省域甚至是全国尺度主要产茶区土壤酸化现状的报道。而且,前期关于茶园土壤 pH 的研究多以土壤平均 pH 为主,尚缺乏对茶园土壤 pH 在  $<4.5$ 、 $4.5-5.5$  和  $>5.5$  三个酸碱度分布情况的研究报道,这一数据能更好地反映茶园土壤酸化状况。【本研究切入点】利用 2000 年以来发表的文献数据,收集整理我国各产茶省份茶园土壤酸化的数据,一方面了解全国各主要产茶省份茶园土壤酸化情况,另一方面掌握茶园土壤 pH 在  $<4.5$ 、 $4.5-5.5$  和  $>5.5$  三个酸碱度的分布情况。从而从整体上掌握我国茶园土壤酸化情况。【拟解决的关键问题】本研究拟明确我国主要产茶省份茶园土壤酸化状况,尤其是 pH 在  $<4.5$ 、 $4.5-5.5$  和  $>5.5$  三个酸碱度的分布情况,研究结果可为茶园土壤酸化防治提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本文以我国各主要产茶区土壤酸化情况为研究对象,收集筛选截止到 2016 年以来,在中国知网和 web of science 上发表的相关文献,共计 99 篇(电子附表 1)。筛选标准为至少包括 20 个以上茶园取样点的文献报道,主要发表于核心期刊。利用中国知网,收集筛选出 40 篇涉及土壤 pH 在  $<4.5$ 、 $4.5-5.5$  和  $>5.5$  三个酸碱度分布的文献,用于分析茶园土壤酸化程度(电子附表 2)。同时收集到 22 篇有关茶园和邻近森林或者荒地的文献,用于分析森林或者荒地改种茶树后对土壤 pH 的影响(电子附表 3)。最后利用 2005 年启动的全国土壤测土配方



表 2 通过文献收集分析各省茶园土壤 pH 分布情况

Table 2 Soil pH distribution in different levels of acidification of the different tea cultivation provinces and the whole country

省份	文献数目	取样点数	pH<4.5	4.5<pH<5.5	pH>5.5
Province	Number of papers	Number of samples	(%)	(%)	(%)
福建 Fujian	10	7812	65.4	31.5	3.1
广东 Guangdong	3	104	32.9	60.2	7.0
贵州 Guizhou	1	201	78.1	18.9	3.0
湖北 Hubei	7	516	40.4	41.7	18.0
海南 Hainan	1	20	50.0	50.0	0.0
河南 Henan	1	147	67.0	33.0	0.0
湖南 Hunan	3	435	36.3	57.4	6.3
江苏 Jiangsu	3	52	63.3	36.7	0.0
江西 Jiangxi	1	106	100.0	0.0	0.0
四川 Sichuan	2	123	14.6	68.3	17.1
云南 Yunnan	2	64	100.0	0.0	0.0
浙江 Zhejiang	6	3926	27.4	58.6	14.0
全国 Whole country	40	13506	52.0	41.0	7.0

表 3 茶园与附近森林土壤 pH 比较

Table 3 Soil pH of the tea garden and adjacent forest

	茶园	森林	森林-茶园	(森林-茶园)/茶园(%)
	Tea	Forest	Forest - Tea	(Forest - Tea)/Tea (%)
平均值 Averaged	4.28	5.17	0.89	16.8
最小值 Min	3.52	3.87	0.27	5.6
25% Q	3.91	4.70	0.48	10.1
中位数 Median	4.29	5.20	0.75	14.0
75% Q	4.60	5.71	1.29	22.9
最大值 Max	5.53	6.21	2.37	39.8

表 4 安溪县和松阳县茶园、水稻和果蔬等不同作物体系下土壤 pH

Table 4 Soil pH of tea garden, rice and vegetable or fruit in the countries of Anxi and Songyang

地点	作物	采样点数	pH<4.5	4.5<pH<5.5	pH>5.5	平均值	最小值	25% Q	中位数	75% Q	最大值
Site	Crop	Number of point	(%)	(%)	(%)	Average	Min		Median		Max
安溪 Anxi	茶叶 Tea	4992	72.5	24.8	2.7	4.2	3.0	3.8	4.1	4.5	7.3
	水稻 Rice	57	12.3	56.1	31.6	5.3	3.8	5.0	5.2	5.7	6.5
	果蔬等 Vegetable	13	7.7	23.1	69.2	6.2	4.0	5.3	6.8	7.0	7.1
松阳 Songyang	茶叶 Tea	440	11.6	70.9	17.5	5.1	3.2	4.7	5.1	5.3	6.3
	水稻 Rice	759	1.6	83.0	15.4	5.2	4.0	5.0	5.2	5.4	7.7
	果蔬等 Vegetable	224	9.4	71.0	19.6	5.4	4.2	4.8	5.3	5.5	8.3

个单位。而且茶园土壤 pH<4.5 的比例高达 72.5%，远高于水稻和果蔬的 12.3 和 7.7%。松阳县茶园土壤平均 pH 为 5.1，分别比水稻和果蔬等土壤 pH 低 0.1 和 0.3 个单位。松阳县土壤 pH 主要在 4.5—5.5 这一区间，其中茶园、水稻和果蔬等作物在此区间的比例分别占到 70.9%、83.0%和 71.0%。

3 讨论

我国农田土壤酸化作为土壤退化的一个方面越来越严重，成为农业可持续发展的一个重要限制因素<sup>[13-16]</sup>。我们的研究结果发现，我国主要产茶省份茶园土壤平均 pH 为 4.73。与我国森林土壤 5.74 的土壤

平均 pH 相比, 要低 1.01 个单位<sup>[17]</sup>; 与我国主要经济作物土壤平均 pH 相比也要低 0.85 个单位<sup>[16]</sup>; 更是远远低于全国农业技术推广服务中心 2015 年公布的 2005—2014 年全国测土配方施肥土壤基础养分数据中 6.7 这一全国土壤平均 pH<sup>[18]</sup>。同时, 各省份之间差别很大, 山东和河南省茶园土壤平均 pH 在 5.5 以上, 分别达到 5.76 和 5.54。这主要是由于山东和河南省茶园主要分布在日照、青岛和信阳等几个地方, 该地区土壤以碱性为主。而处于我国南方红黄壤区的福建、广东、广西和贵州等地土壤平均 pH 均在 5.0 以下, 尤其是江西和四川省的茶园土壤平均 pH 在 4.0 以下, 分别低至 3.86 和 3.97, 属于严重酸化土壤。这主要与当地土壤类型本身就是酸性土壤有关<sup>[19]</sup>。

土壤 pH 在各区间的分布也是反映土壤酸化程度的一个重要指标。一般认为 4.5—5.5 是茶树生长最适宜的土壤 pH 范围。我们研究发现, 全国只有 41% 的茶园土壤 pH 在 4.5—5.5 这一区间。高达 52% 的土壤 pH 在 4.5 以下, 属于不适宜茶树生长的 pH 范围 (表 2)。根据全国农业技术推广服务中心 2015 年公布的 2005—2014 年全国测土配方施肥土壤基础养分数据, 湖南、浙江、广东、江西和福建 5 个省份农田土壤平均 pH 低于 5.5 的分别占到 29.2%、41.9%、54.3%、92.3% 和 85.4%<sup>[18]</sup>。我们对这几个省份的研究发现, 茶园土壤平均 pH 低于 5.5 的比例分别高达 93.7%、86.0%、93.0%、100% 和 96.9% (表 2)。因此需要通过各种土壤改良措施提高茶园土壤 pH, 保障茶叶绿色高产和安全。

与森林和其他作物种植体系相比, 通常茶园土壤具有更低的土壤 pH。在我们的研究中, 与周边森林或者荒地相比, 茶园土壤平均 pH 要低 0.89 个单位 (表 3)。同时对两个典型产茶县不同作物土壤 pH 的研究发现, 茶园土壤不仅平均 pH 要低于水稻和果蔬等土壤, 而且土壤 pH < 4.5 的比例也远远大于水稻和果蔬等种植体系。

造成茶园土壤酸化的因素众多, 主要的致酸因素包括: (1) 茶树根系分泌  $H^+$ , 以及草酸、柠檬酸、苹果酸等有机酸类物质, 这些物质解离产生有机酸根阴离子和  $H^+$ , 强降雨条件下有机酸根离子淋洗出土壤造成土壤酸化<sup>[20]</sup>。(2) 铝在茶树-土壤过程中的生物地球化学循环。一方面, 茶树对铝的吸收累积能力强, 在吸收大量铝的同时向土壤中释放  $H^+$  造成土壤酸化<sup>[21-22]</sup>。另一方面, 土壤中铝被吸收后随修剪枝叶返回土壤, 而钾、钙、钠和镁等盐基离子淋洗出土壤,

造成土壤中铝的累积, 从而造成土壤酸化<sup>[23-24]</sup>。(3) 氮肥大量施用, 尤其是铵态氮肥在茶园大量施用。一方面茶树在吸收铵态氮肥的同时释放  $H^+$ <sup>[25-26]</sup>; 另一方面铵态氮在土壤中发生硝化反应释放  $H^+$ <sup>[27-30]</sup>。此外, 强降雨下硝态氮被淋洗出土壤的同时带走大量盐基离子, 造成土壤酸中和能力的下降<sup>[5]</sup>。

大量研究表明, 长期施用有机肥或者将有机肥与化肥配合施用可以维持土壤酸碱平衡, 减缓土壤酸化<sup>[15, 31-32]</sup>。这主要是由于有机肥能够补充植物吸收带走和伴随阴离子淋洗损失的土壤盐基离子, 提高土壤缓冲能力。同时有机肥含有大量有机质, 对土壤盐基离子具有很强的吸附能力, 从而降低其淋洗损失, 因此长期施用有机肥能够提高土壤阳离子交换量, 提高土壤酸缓冲容量<sup>[33-34]</sup>。而我国茶园普遍存在氮肥用量高, 氮肥利用效率低, 而有机肥用量严重不足的问题, 进一步加剧了土壤酸化<sup>[35-36]</sup>。因此, 茶园生产管理中一方面要降低氮肥的施用量, 另一方面增加有机肥施用量, 从而防止茶园土壤进一步酸化。

## 4 结论

我国茶园土壤平均 pH 为 4.73, 而且只有 41% 的茶园土壤处于  $4.5 < pH < 5.5$  这一最适宜茶树生长的区间, 高达 52% 的土壤 pH 在 4.5 以下, 处于严重酸化程度。与其他农田和森林土壤相比, 茶园土壤具有较低的土壤 pH。因此, 为保障我国茶产业绿色可持续发展, 必须采取适当的农业生产管理措施防止土壤进一步酸化。

## References

- [1] 农业农村部种植业管理司. 2017 年全国各产茶省茶园面积、产量和产值统计. 中国茶叶, 2018(6): 27.  
Department of Planting Management, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Statistics on area, output and output value of tea gardens in tea producing provinces across the country in 2017. *China Tea*, 2018(6): 27. (in Chinese)
- [2] 韩文炎, 阮建云, 林智, 吴洵, 许允文, 石元值, 马立峰. 茶园土壤主要营养障碍因子及系列茶树专用肥的研制. 茶叶科学, 2002, 22(1): 70-74.  
HAN W Y, RUAN J Y, LIN Z, WU X, XU Y W, SHI Y Z, MA L F. The major nutritional limiting factors in tea soils and development of tea speciality fertilizer series. *Journal of Tea Science*, 2002, 22(1): 70-74. (in Chinese)
- [3] 廖万有, 王宏树, 苏有键, 康启兵. 我国茶园土壤的退化问题及其

- 防治. 茶叶科技创新与产业发展学术研讨会, 2009.
- LIAO W Y, WANG H S, SU Y J, KANG Q B. Soil degeneration and its prevention in Chinese tea gardens. Symposium of Tea Science and Technology Innovation and Industry Development, 2009. (in Chinese)
- [4] YAN P, SHEN C, FAN L C, LI X, ZHANG L P, ZHANG L, HAN W Y. Tea planting affects soil acidification and nitrogen and phosphorus distribution in soil. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2018, 254: 20-25.
- [5] YANG X D, NI K, SHI Y Z, YI X Y, ZHANG Q F, FANG L, MA L F, RUAN J Y. Effects of long-term nitrogen application on soil acidification and solution chemistry of a tea plantation in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 252: 74-82.
- [6] 林智, 吴洵, 俞永明. 土壤 pH 值对茶树生长及矿质元素吸收的影响. 茶叶科学, 1990(2): 27-32.
- LIN Z, WU X, YU Y M. Influence of soil pH on the growth and mineral elements absorption of tea plant. *Journal of Tea Science*, 1990(2): 27-32. (in Chinese)
- [7] 阮建云, 吴洵. 钾、镁营养供应对茶叶品质和产量的影响. 茶叶科学, 2003, 23(增刊): 21-26.
- RUAN J Y, WU X. Productivity and quality response of tea to balanced nutrient management including K and Mg. *Journal of Tea Science*, 2003, 23(suppl.): 21-26. (in Chinese)
- [8] 章明奎, 方利平, 张履勤. 酸化和有机质积累对茶园土壤铅生物有效性的影响. 茶叶科学, 2005, 25(3): 159-164.
- ZHANG M K, FANG L P, ZHANG L Q. Effects of acidification and organic matter accumulation on lead bio-availability in tea garden soils. *Journal of Tea Science*, 2005, 25(3): 159-164. (in Chinese)
- [9] 孙继海, 吴子铭. 茶园土壤活性酸度动态、土壤酸化及最适酸度的初步研究. 土壤肥料, 1980(3): 16-23.
- SUN J H, WU Z M. Dynamic acidity dynamics of soil in tea gardens: preliminary study on soil acidification and optimum acidity. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 1980(3): 16-23. (in Chinese)
- [10] WANG H, XU R K, WANG N, LI X H. Soil acidification of alfisols as influenced by tea cultivation in eastern China. *Pedosphere*, 2010, 20(6): 800-806.
- [11] LI S Y, LI H X, YANG C L, WANG Y D, XUE H, NIU Y F. Rates of soil acidification in tea plantations and possible causes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 233: 60-66.
- [12] 张炳铃. 安溪县茶园土壤养分特性评价. 福建农业科技, 2012(7): 40-42.
- ZHANG B L. Evaluation on soil nutrient characters in tea garden of Anxi county. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2012(7): 40-42. (in Chinese)
- [13] 张福锁. 我国农田土壤酸化现状与影响. 民主与科学, 2016(6): 26-27.
- ZHANG F S. Present situation and influence of farmland soil acidification in China. *Democracy & Science*, 2016(6): 26-27. (in Chinese)
- [14] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展. 土壤, 2015, 47(2): 238-244.
- XU R K. Research progresses in soil acidification and its control. *Soils*, 2015, 47(2): 238-244. (in Chinese)
- [15] 徐仁扣, 李九玉, 周世伟, 徐明岗, 沈仁芳. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 160-167.
- XU R K, LI J Y, ZHOU S W, XU M G, SHEN R F. Scientific issues and controlling strategies of soil acidification of croplands in China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 160-167. (in Chinese)
- [16] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, SHEN J L, HAN W X, ZHANG W F, CHRISTIE P, GOULDING K W P, VITOUSEK P M, ZHANG F S. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327: 1008-1010.
- [17] 朱齐超. 区域尺度中国土壤酸化定量研究及模型分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- ZHU Q C. Quantification and modelling of soil acidification at regional scale of China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [18] 全国农业技术推广服务中心. 测定配方施肥土壤基础养分数据集. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- National Agricultural Technology Extension Service Center. *Data Set of Soil Ingenious Fertility From the Project of Testing Soil for Formulated Fertilization*. Beijing: China Agriculture Press, 2015. (in Chinese)
- [19] 孙波. 红壤退化阻控与生态修复. 北京: 科学出版社, 2011.
- SUN B. *Control and Ecological Rehabilitation of Red Soil Degradation*. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [20] 杨亚军. 中国茶树栽培学. 上海: 上海科学技术出版社, 2005.
- YANG Y J. *Tea Cultivation in China*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Press, 2005. (in Chinese)
- [21] WAN Q, XU R K, LI X H. Proton release from tea plant (*Camellia sinensis* L.) roots induced by Al(III) under hydroponic conditions. *Soil Research*, 2012, 50(6): 482-488.
- [22] WAN Q, XU R K, LI X H. Proton release from tea plant (*Camellia sinensis* L.) roots as affected by five cations in solution culture. *Plant, Soil and Environment*, 2012, 58(9): 429-434.
- [23] 丁瑞兴, 黄晓. 茶园—土壤系统铝和氟的生物地球化学循环及其对土壤酸化的影响. 土壤学报, 1991(3): 229-236.
- DING R X, HUANG X. Biogeochemical cycle of aluminium and

- fluorine in tea garden soil system and its relationship to soil acidification. *Acta Pedologica Sinica*, 1991(3): 229-236. (in Chinese)
- [24] 宋木兰, 刘友林. 茶园—土壤系统的物质循环对土壤酸化的影响. 茶叶科学, 1990(2): 19-26.
- SONG M L, LIU Y L. Effect of biogeochemical cycle in tea garden on the soil acidification. *Journal of Tea Science*, 1990(2): 19-26. (in Chinese)
- [25] RUAN J Y, MA L F, SHI Y Z, ZHANG F S. Effects of litter incorporation and nitrogen fertilization on the contents of extractable aluminium in the rhizosphere soil of tea plant (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze). *Plant and Soil*, 2004, 263(1): 283-296.
- [26] 万青, 徐仁扣, 黎星辉. 氮素形态对茶树根系释放质子的影响. 土壤学报, 2013, 50(4): 84-89.
- WAN Q, XU R K, LI X H. Effect of forms of nitrogen on proton release from tea plant roots under hydroponic condition. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4): 84-89. (in Chinese)
- [27] ZHU Q C, VRIES W D, LIU X J, HAO T X, ZENG M F, SHEN J B, ZHANG F S. Enhanced acidification in Chinese croplands as derived from element budgets in the period 1980–2010. *Science of the Total Environment*, 2017, 618: 1497-1505.
- [28] VRIES W, BREEUWSMA A. The relation between soil acidification and element cycling. *Water Air and Soil Pollution*, 1987, 35(3): 293-310.
- [29] MAO Q G, LU X K, ZHOU K J, CHEN H, ZHU X M, MORI T K, MO J M. Effects of long-term nitrogen and phosphorus additions on soil acidification in an N-rich tropical forest. *Geoderma*, 2017, 285: 57-63.
- [30] TIAN D S, NIU S L. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(2): 024019.
- [31] 徐明岗, 文石林, 周世伟. 南方地区红壤酸化及综合防治技术. 科技创新与品牌, 2016(7): 74-77.
- XU M G, WEN S L, ZHOU S W. Acidification and comprehensive control technology of red soil in southern China. *Sci-Tech Innovations and Brands*, 2016(7): 74-77. (in Chinese)
- [32] CAI Z J, WANG B R, XU M G, ZHANG H M, HE X H, ZHANG L, GAO S D. Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(2): 260-270.
- [33] CAI A D, ZHANG W J, XU M G, WANG B R, WEN S L, ATIZAZ S. Soil fertility and crop yield after manure addition to acidic soils in South China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2018, 111(1): 61-72.
- [34] CAI A D, XU M G, WANG B R, ZHANG W J, LIANG G P, HOU E Q, LUO Y Q. Manure acts as a better fertilizer for increasing crop yields than synthetic fertilizer does by improving soil fertility. *Soil & Tillage Research*, 2018, 189: 168-175.
- [35] 马立锋, 陈红金, 单英杰, 姜铭北, 张耿苗, 吴林土, 阮建云, 吕健飞, 石元值, 潘理勋, 黄承沐, 刘林敏, 梁碧元, 王美琴, 潘建清. 浙江省绿茶主产区茶园施肥现状及建议. 茶叶科学, 2013, 33(1): 74-84.
- MA L F, CHEN H J, SHAN Y J, JIANG M B, ZHANG G M, WU L S, RUAN J Y, LÜ J F, SHI Y Z, PAN L X, HUANG C M, LIU L M, LIANG B Y, WANG M Q, PAN J Q. Status and suggestions of tea garden fertilization on main green tea-producing counties in Zhejiang Province. *Journal of Tea Science*, 2013, 33(1): 74-84. (in Chinese)
- [36] CHEN C F, LIN J Y. Estimating the gross budget of applied nitrogen and phosphorus in tea plantations. *Sustainable Environment Research*, 2016: S24: 124-130.

(责任编辑 李云霞)