



## •研究报告•

# 未来气候变化对不同国家茶适宜分布区的影响

张晓玲<sup>1,2</sup> 李亦超<sup>2</sup> 王芸芸<sup>2</sup> 蔡宏宇<sup>2</sup> 曾 辉<sup>1\*</sup> 王志恒<sup>2\*</sup><sup>1</sup> (北京大学城市规划与设计学院, 北京大学深圳研究生院, 广东深圳 518055)<sup>2</sup> (北京大学城市与环境学院生态学系, 北京大学生态研究中心, 北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 茶是对气候变化敏感的重要经济作物, 评价全球气候变化对茶分布和生产的影响对相关国家经济发展和茶农的生计至关重要。本研究基于全球858个茶分布点和6个气候因子数据, 利用物种分布模型预测全球茶的潜在适宜分布区及其在2070年的不同温室气体排放情景(RCP2.6和RCP8.5)下的变化。结果表明: 当前茶在五大洲均有适宜分布区, 主要集中在亚洲、非洲和南美洲, 并且最冷季平均温和最暖季降水量主导了茶的分布。预计2070年, 茶的适宜分布区变化在不同的大洲、国家和气候情景间将存在差异。具体来说, 茶的适宜分布区总面积将会减少, 减少的区域主要位于低纬度地区, 而中高纬度地区的适宜分布区将扩张, 由此可能导致茶的适宜分布区向北移动; 重要的产茶国中, 阿根廷、缅甸、越南等茶适宜分布区面积会减少57.8%–95.8%, 而中国和日本的适宜分布面积则会增加2.7%–31.5%。未来全球新增的适宜分布区中, 约有68%的地区土地覆盖类型为自然植被, 因此可能导致新茶树种植园的开垦和自然植被及生物多样性保护产生冲突。

**关键词:** 气候变化; 茶树种植; 物种分布模型; 生物多样性保护; 土地覆盖

## Influence of future climate change in suitable habitats of tea in different countries

Xiaoling Zhang<sup>1,2</sup>, Yichao Li<sup>2</sup>, Yunyun Wang<sup>2</sup>, Hongyu Cai<sup>2</sup>, Hui Zeng<sup>1\*</sup>, Zhiheng Wang<sup>2\*</sup><sup>1</sup> School of Urban Planning and Design, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen, Guangdong 518055<sup>2</sup> Institute of Ecology and Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871

**Abstract:** Tea (*Camellia sinensis*) is an important crop and is sensitive to climate change. Evaluating the impact of climate change on tea distribution and production is not only important for the global economy but also the livelihoods of farmers in many countries. Here we compiled data from 858 global occurrences of *C. sinensis* and six climatic variables, and used species distribution model (SDM) to predict the current potential distribution and possible range shifts in response to climate change in 2070 under Representative Concentration Pathway 2.6 and 8.5 (RCP2.6 and RCP8.5). The results indicate that the current potential distribution of tea is mainly confined to Asia, Africa and South America, and distribution is limited by mean temperature of coldest quarter (MTCQ) and precipitation of warmest quarter (PWQ). Under future climate change scenarios, by 2070 suitable habitat for tea could significantly shrink at low latitudes, but expand at middle latitudes, leading to a northward shift of the distribution. However, the influence of future climate change on tea distribution differed across regions. The climatically suitable areas in Argentina, Myanmar, and Vietnam are projected to decrease by 57.8%–95.8%, whereas those in China and Japan are projected to increase by 2.7%–31.5%. Moreover, 68% of the new suitable habitat for tea cultivation under future climate change are predicted to lie within areas of natural vegetation cover. Therefore, the establishment of new tea gardens in these areas may lead to conflicts between tea cultivation and conservation of natural vegetation and biodiversity.

**Key words:** climate change; tea plantation; species distribution model; biodiversity conservation; land cover

收稿日期: 2019-03-18; 接受日期: 2019-05-06

基金项目: 科技部重点研发计划(2017YFA0605101)和国家自然科学基金(31522012; 31470564; 31621091)

\* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: zhiheng.wang@pku.edu.cn; zengh@pkus.edu.cn

过去的一个世纪,全球气候变暖,极端天气频发,且到2100年全球平均气温还将上升1.0–3.7℃(IPCC, 2013)。研究表明,气候变化不仅显著影响了农作物的产量和品质(Parry et al, 2007; Lobell et al, 2011; Davis et al, 2012),还会显著影响农作物的分布(Parry et al, 2007)。全球气候变化背景下,农业生产面临巨大的挑战(Schmidhuber & Tubiello, 2007; Campbell et al, 2016)。

茶(*Camellia sinensis*)是世界上最重要的经济作物之一(Mondal et al, 2004; Chen & Chen, 2012),茶饮料的流行程度仅次于水(Chen & Zhou, 2005)。茶是多年生常绿植物,起源于中国西南–印度阿萨姆一带,适应温暖潮湿的季风气候(Carr, 1972),广泛分布或栽培于48个国家和地区(FAOSTAT, 2016)。从49° N (乌克兰)至30° S (南非),从海平面到海拔2,700 m的高山,从地中海气候到湿热的热带,茶均有分布(Owuor et al, 2010)。根据联合国粮食与农业组织(FAO)统计,2016年全球茶的种植面积为634万公顷,年产量达到837万吨(FAOSTAT, 2016)。

茶树是对气候变化最敏感的农作物之一(Ochieng et al, 2016)。温度和水分等气候条件的变化,影响着茶叶的产量、品质和种植布局(黄寿波等, 1993; 金志凤等, 2014; Ochieng et al, 2016; Nowogrodzki, 2019)。当冬季低温低于–10℃时,茶树将无法存活;而当夏季温度超过30℃时,也不利于茶树的生长(Han et al, 2018)。Duncan等(2016)发现当月平均温度超过26.6℃时,茶的产量会下降。Ahmed等(2014)发现生长季降水越多,茶的产量越高,但茶的品质反而下降。以往的研究多集中在气候变化对茶的产量和品质的影响,以及评估当前茶树的气候适宜性和生产潜力(Wijeratne et al, 2007; Nemec-Boehm et al, 2014; 金志凤等, 2014, 2016)。然而在宏观尺度,特别是在全球范围的大尺度上,有关未来气候变化对茶地理分布区将产生怎样的影响,仍研究较少。评估气候变化对茶分布的影响,有助于产茶区通过合理的茶园规划以更好地应对未来气候变化带来的影响。此外,近些年来,由于茶树种植园带来的经济效益,许多森林被砍伐而开垦成茶树种植园,这种现象在中国和东南亚地区尤为严重(Li et al, 2012)。未来气候变化对茶分布区的影响,是否会加剧茶树种植园和自然植被以及生物多样性保护之间的矛盾也值得关注。

在评价气候变化对物种分布的影响时,物种分布模型是一个很有效的工具(Pearson & Dawson, 2003)。它基于物种现有分布和环境(变量)之间的关系,预测不同环境情景下的物种分布(Araújo & Peterson, 2012)。近年来,物种分布模型在评价气候变化对农作物(如咖啡、葡萄、可可等)分布的影响中得到了广泛应用(Davis et al, 2012; Hannah et al, 2013; Ovalle-Rivera et al, 2015; Schroth et al, 2016)。国际热带农业中心(CIAT)也曾利用物种分布模型评价了气候变化对肯尼亚和乌干达等茶分布区的影响(Eitzinger et al, 2011a, b),但是气候变化对全球范围的茶分布的影响尚不明确。

基于此,本研究将运用全球茶分布数据和气候变量数据,通过构建物种分布模型,评价未来气候变化对全球茶潜在适宜分布区的影响,为茶树种植产业的可持续发展和应对气候变化提供数据支撑。具体包括:(1)预测现在茶适宜分布区及其在未来(~2070年)的变化;(2)分析未来气候变化对主要国家茶适宜分布区的影响;(3)评价未来茶适宜分布区的变化与各种土地覆盖/利用类型之间的矛盾。

## 1 数据来源与方法

### 1.1 茶分布数据

茶分布数据来源于中国国家标本资源共享平台(<http://www.nsii.org.cn>)和全球生物多样性信息网络数据库(<https://www.gbif.org/>),只保留具有经纬度坐标的分布记录。为确保茶分布点是处于野外生存状态(包括人工种植茶园和野生分布),我们逐一校对每条记录的位置信息描述,去除了分布于温室、植物园及学校等地的记录。其次,为保证数据密度的一致性,我们将上述茶分布点坐标转化成2.5'的栅格,每个栅格里只有1个分布点。最终,得到分布于29个国家和地区的858个有茶分布的栅格(经纬度坐标见附录1)用于构建物种分布模型。

由于858个茶分布点多数位于中国,因此我们评价了这种数据分布的不均匀性是否会对结果造成影响。我们随机抽取一半位于中国的茶分布点数据,加上分布于中国之外的数据,构成新的茶分布数据,采取同样的方法构建物种分布模型。结果表明,采用两种分布数据构建的物种分布模型预测的结果没有明显差异,故后续采用了基于全部数据的模型进行分析(附录2)。

1.2 环境变量

1.2.1 现代气候

现代气候数据来源于世界气候数据网站 (<http://www.worldclim.org/>), 根据1960–1990年的气候观测数据插值获得的, 共包含19个生物气候变量, 分辨率为 $2.5' \times 2.5'$ 。为了消除环境变量之间的共线性, 我们计算了不同变量之间的Pearson相关系数, 并据此对变量进行筛选(Dormann et al, 2013)。当变量间的相关系数  $> 0.8$ 时(附录3), 将其分为一组, 并根据以往的研究从每组变量中选择与茶树生长密切相关的一个因素(Carr, 1972; Han et al, 2018)。最终选取6个生物气候变量, 包括平均气温日较差(mean diurnal temperature range, MDTR)、最暖月最高温(max temperature of warmest month, MTWM)、最冷季平均温(mean temperature of coldest quarter, MTCQ)、最干月降水量(precipitation of driest month, PDM)、降水季节性(precipitation seasonality, PS)和最暖季降水量(precipitation of warmest quarter, PWQ)。这些变量反映了茶树生长所需要的温度和水分条件, 其中最暖月最高温和最冷季平均温反映了茶树生长的温度适宜性的上下限。

1.2.2 土壤pH

研究表明, 茶树适宜生长在酸性土壤中(Han et al, 2018), 因此我们从联合国粮食及农业组织网站 (<http://www.fao.org>)下载了世界土壤数据库(HWSD), 从中获取分辨率为 $30''$ 的土壤pH数据。用双线性内插法(bilinear)将土壤pH数据重新采样为分辨率 $2.5'$ 的栅格数据, 与气候因子及物种分布数据的分辨率匹配, 用于构建物种分布模型。初步分析发现, 土壤pH在模型所有变量中的重要性为0 (表1), 故后续分析仅采用6个气候变量用于物种分布模型构建。

表1 7个环境变量的平均重要性

Table 1 Mean importance of seven environmental variables

环境变量 Environmental variables	平均重要性 Mean importance
最冷季平均温 Mean temperature of coldest quarter	0.36
最暖季降水量 Precipitation of warmest quarter	0.27
降水季节性 Precipitation seasonality	0.09
平均气温日较差 Mean diurnal temperature range	0.06
最暖月最高温 Max temperature of warmest month	0.04
最干月降水量 Precipitation of driest month	0.03
土壤酸碱度 Soil pH	0.00

1.2.3 未来气候

未来气候数据同样来源于世界气候数据库 (<http://www.worldclim.org/>)。IPCC第五次评估报告采用了不同的大气环流模型(General Circulation Models, GCMs)模拟不同经济和技术发展情景下的未来气候(IPCC, 2013)。本研究选用的GCM是基于中国国家气候中心建立的气候系统模式, 即BCC-CSM1-1。该模式性能稳定, 能够较好地再现当今气候和季节变化特征, 尤其对夏季亚洲季风降水和环流具有较好的模拟能力(Wu et al, 2014)。亚洲作为世界最大的茶产区, 季风对茶的产量有着深刻的影响(Nemec-Boehm et al, 2014)。未来气候数据包括4种气候情景, 用代表性的浓度路径(representative concentration pathways, RCPs)来表示, 从低到高分别为RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5, 不同的数值表示2100年相对于1750年辐射强迫的变化。本研究选择2070年(2061–2080年平均)下的RCP2.6和RCP8.5这两种相对极端的气候情景。RCP2.6是积极减排CO<sub>2</sub>的情景, 其辐射强迫在2010–2020年间达到大约3 W/m<sup>2</sup>的峰值, 然后下降, 温度上升约0.3–1.7℃; RCP8.5情景表示一直保持高强度的CO<sub>2</sub>排放, 到2100年其辐射强迫达到8.5 W/m<sup>2</sup>, 温度上升约2.6–4.8℃(IPCC, 2013)。

1.3 土地覆盖数据

全球土地覆盖数据来源于欧盟联合研究中心空间应用研究所的2000年全球土地覆盖数据产品GLC2000 (Bartholome & Belward, 2005), 分辨率为1 km, 包括23种土地覆盖类型。我们将其重新分为6大类, 包括森林、灌木、草地、耕地、建筑用地及其他(附录4)。

1.4 物种分布模型及评价方法

利用茶分布数据和环境变量在R语言(R Core Team, 2017)的biomod2程序包(Thuiller et al, 2009)中构建物种分布模型。Biomod2是目前常用的物种分布模型平台, 可以整合多个模型的结果, 提高预测的准确率。本研究采用的物种分布模型算法包括: 广义线性模型(generalized linear model, GLM; McCullagh & Nelder, 1989)、随机森林模型(random forest, RF; Liaw & Wiener, 2002)和最大熵模型(maximum entropy model, MaxEnt; Phillips et al, 2006)。三种算法的参数设置均采用biomod2包中的默认值。

本研究中茶的分布数据是“有”(presence), 缺少



“无”(absence, 很难精确获取), 但是3个模型均需要茶分布为“无”的数据。因此, 我们随机生成两套伪无分布(pseudo-absence)数据, 每套数据里均含有10,000个“伪无”分布点(Barbet-Massin et al, 2012), 和茶的“有”分布点构成完整的presence-absence分布数据。之后将完整的分布数据随机分割成两部分, 70%的分布数据用来建模(training), 30%的数据用来评价模型的表现(evaluating), 并且重复5次。基于biomod2中的如下方法计算了每个变量对茶分布影响的重要性。首先, 使用选定的所有环境变量进行建模并生成预测(参考预测); 其次, 将某个环境变量随机化再进行新的预测, 并且对每个环境变量都重复3次这样的过程; 最后, 计算参考预测和新预测之间的Pearson相关系数, 每个环境变量的重要性为1和3次重复过程中所得的Pearson相关系数的平均值之间的差值。最终将三个物种分布模型得到的变量重要性进行平均, 计算各因子的平均重要性。为了充分利用数据, 最后采用100%的数据用来建模和预测, 共生成36个物种分布模型。

使用partial ROC (receiver operating characteristic; Peterson et al, 2008)和TSS (True skill statistics; Allouche et al, 2006)这两种常用方法来评价模型的表现。相比传统的ROC方法, pROC考虑了遗漏错误(omission error)和记账错误(commission error)不平衡的问题, 并给予遗漏错误更多的权重(Peterson et al, 2008; 朱耿平等, 2017), 可以更合理地评估模型。pROC采用AUC比率(AUC ratio)来评估模型的预测能力, 当AUC比率 > 1时, 说明模型预测结果优于随机; 当AUC比率 < 1时, 说明模型预测效果较差。AUC比率的计算使用R语言 (R Core Team, 2017)里的“kuenm”包中的kuenm\_proc函数(Cobos et al, 2019)。

具体地, 我们设置5%的omission error ( $E = 5\%$ ), 随机选取50%的评价数据(evaluating data), 并且重复200次, 取平均值作为该模型的AUC比率。TSS是真实技巧统计值, 计算公式为  $TSS = \text{灵敏度}(\text{sensitivity}) + \text{特异度}(\text{specificity}) - 1$ 。其中灵敏度是实际有分布且被预测为有分布的概率, 特异度是实际上无分布且被正确预测为无分布的概率。TSS的值介于-1到1之间, 当  $TSS > 0$ , 证明模型优于随机; 当  $TSS > 0.5$ , 认为模型表现良好(Allouche et al, 2006)。为了减小表现差的模型导致的不确定性, 在

36个物种分布模型中, 只有AUC比率 > 1.2且  $TSS > 0.5$ 的模型预测结果会被用来参与最终的模型集成(ensemble)。在进行模型集成时, 以36个模型的TSS值为权重将所有模型的结果加权平均。模型集成的结果是介于0-1之间的概率值, 采用MaxTSS为阈值(Gallien et al, 2010), 将其转化成有无(0,1)分布。具体方法为, 首先随机生成介于0-1之间包含202个数的等差数列, 删除0和1, 剩下200个值(如0.004975, 0.00995, …, 0.99502); 其次以这200个值为阈值, 将模型集成预测结果转换成有无(0,1)分布并与实际观测的物种分布生成混淆矩阵, 计算每一个阈值下的TSS, 当TSS达到最大时, 该阈值被采用。

## 1.5 数据分析

为了计算茶适宜分布区面积, 我们进行古德等面积投影变换。茶适宜分布区的变化以未来情景下的茶适宜分布区减去现在茶适宜分布区计算。茶的分布区变化分为三种状态: 稳定存在(stable), 即现在和未来都有分布; 收缩(contraction), 即现在有分布, 而未来没有; 扩张(expansion), 即现在没有分布, 而未来有。此外, 我们统计未来气候变化情景下各个国家茶的适宜分布区面积的变化, 探讨主要产茶国的适宜分布区面积变化, 并按分布区变化的面积进行排序, 选取分布区面积减少和增加最多的各10个国家。最后, 为了分析未来茶分布区的扩张和各种土地覆盖类型重叠的比例, 将预测的未来茶适宜分布图与重新分类后的土地覆盖类型图层叠加, 计算新增茶适宜分布区中各种土地覆盖类型所占的比例。

以上分析均在R 3.4.2 (R Core Team, 2017)和ArcGIS10.2 (ESRI Inc., Redlands, CA, USA)中完成。

## 2 结果

### 2.1 模型评估和环境变量的重要性

在3种模型中, GLM的AUC比率(平均值  $\pm$  标准差)为  $1.98 \pm 0.05$ , RF为  $1.97 \pm 0.01$ , MaxEnt为  $1.96 \pm 0.02$ ; RF的TSS为  $0.93 \pm 0.03$ , GLM为  $0.90 \pm 0.02$ , MaxEnt为  $0.89 \pm 0.02$ 。所有模型的AUC比率均大于1.9, TSS均大于0.85, 说明模型表现良好, 能准确预测茶的分布。

在6个气候因子中, 最冷季平均温和最暖季降水量对茶分布的贡献最大, 平均重要性分别为0.36

和0.27 (表1)。降水季节性、平均气温日较差、最暖月最高温、最干月降水量对茶分布的贡献类似, 都小于0.1。不同的模型中, 气候因子对茶分布预测的响应曲线存在差异, 最大熵模型和随机森林模型的格局更相似(图1)。当最冷季平均温低于0℃时, 茶的存在概率极低; 随着温度的升高, 茶的存在概率迅速提升; 当最冷季平均温高于约13℃时, 茶的存在概率又迅速下降(图1c)。随机森林和最大熵模型的结果显示, 当最暖季降水量为0-500 mm时, 茶的存在概率很低(< 0.5), 当最暖季降水量高于500 mm时, 茶的存在概率接近于1; 广义线性模型的预测结果则显示随最暖季降水量的变化, 茶的存在概率均很高且变化较小(图1f)。

2.2 当前适宜分布区及未来适宜分布区的变化

茶的实际分布点与预测的现在潜在适宜分布区基本一致(图2)。茶的实际分布和潜在适宜分布都主要集中在亚洲、非洲和南美洲。其中亚洲占绝大多数, 包括中国、日本、印度等传统产茶大国, 其次是南美洲, 主要有阿根廷、秘鲁等, 非洲则集中

于肯尼亚、乌干达、卢旺达等国家(图2)。此外, 结果显示北美洲, 包括美国南部和加拿大西海岸, 欧洲的挪威、西班牙等地区也是茶的适宜分布区(图2)。

未来气候变化下, 不同地区的茶适宜分布区变化不一致, 大部分地区仍为茶的适宜分布区, 而有些地区的茶适宜分布区会出现扩张或者缩小(图3)。具体来看, 在RCP2.6和RCP8.5情景下, 东亚大部分地区仍然适宜茶的分布; 东亚北部、北美洲的加拿大和欧洲的茶适宜分布区均向北扩张; 而东南亚、南美洲、非洲和大洋洲的茶适宜分布区则缩小(图3)。不同气候情景下, 茶的适宜分布区变化也存在差异。RCP2.6情景下, 茶的适宜分布面积净减少9.5%; RCP8.5情景下, 净减少16.9%; 总体上都呈减少的趋势(表2)。

2.3 主要产茶国家未来适宜分布区的变化

不同未来气候情景下、各主要产茶国的茶适宜分布区变化差异较大, 更多国家的茶适宜分布区面积会减少(表3)。RCP2.6情景下, 只有土耳其、日本、中国三个国家的茶适宜分布面积会增加, 分别增加

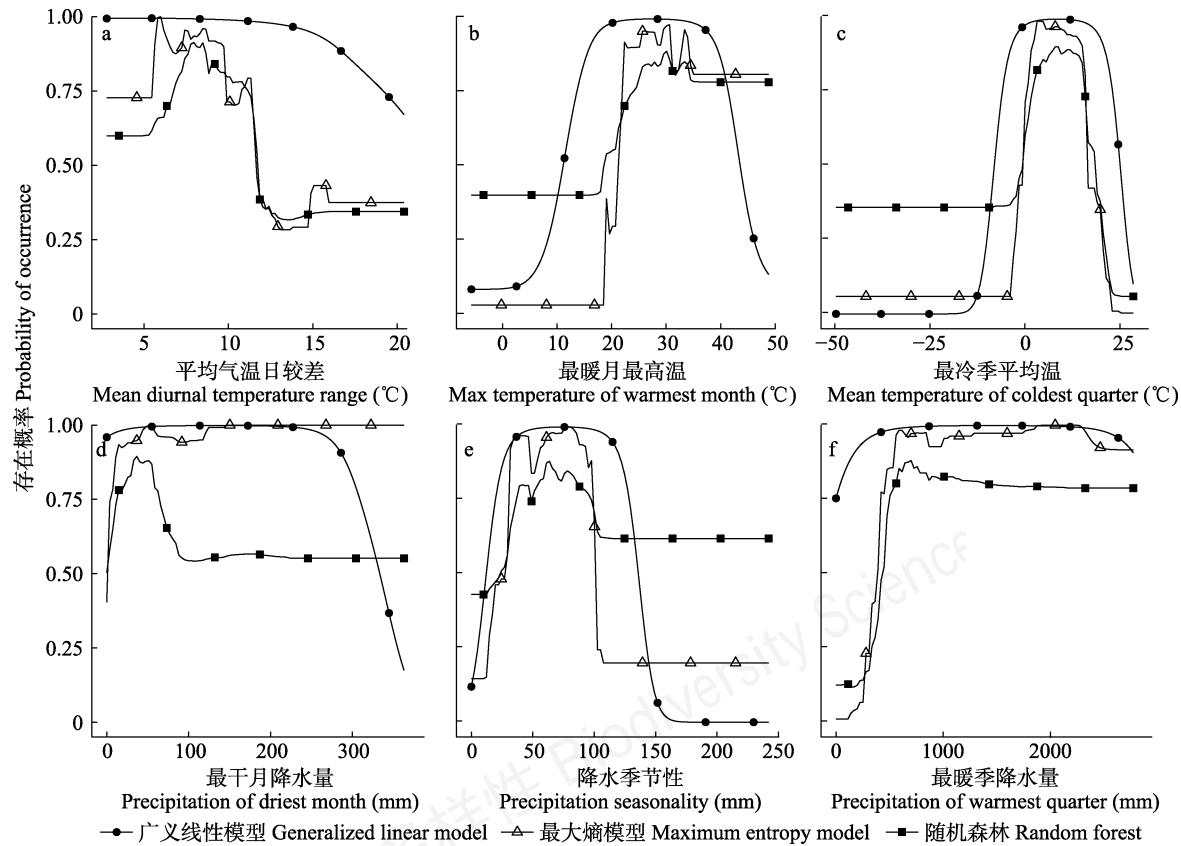


图1 6个气候变量的响应曲线  
Fig. 1 Response curves of six climate variables

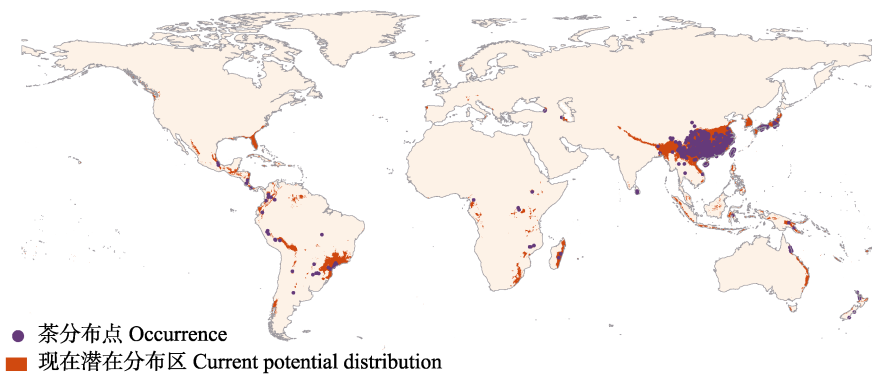


图2 用于物种分布模型构建的茶分布点和预测的现在茶潜在分布(世界地图来源于<https://www.naturalearthdata.com/downloads/50m-physical-vectors/>)  
Fig. 2 Tea occurrence points used for constructing species distribution model and the predicted current potential distribution of tea

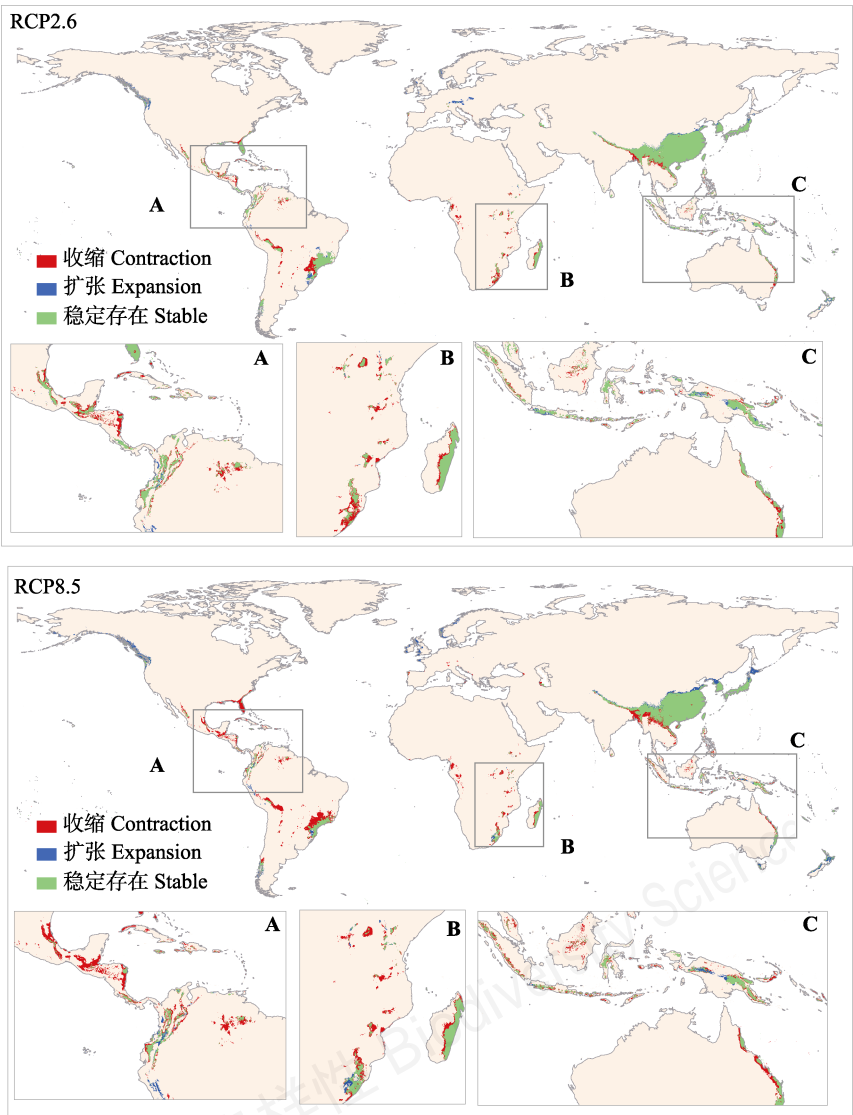


图3 预测的2070年不同气候情景下茶适宜分布区变化(世界地图来源于<https://www.naturalearthdata.com/downloads/50m-physical-vectors/>)  
Fig. 3 Predicted suitable range shifts of tea by 2070s under different climate scenarios

**表2 预测2070年不同气候情景下茶适宜分布区的变化(%)**  
Table 2 Predicted suitable area changes of tea (%) for the 2070s

气候情景 Scenarios	新增的分布区 Gain	丧失的分布区 Loss	适宜分布面积的净变化 Net changes in suitable area
RCP2.6	9.1	18.6	-9.5
RCP8.5	14.2	31.1	-16.9

23.7%、10.0%、2.7%; 其余7个国家茶适宜分布面积均会减少, 特别是阿根廷、缅甸、越南将分别减少94.6%、75.7%、57.8% (表3)。RCP8.5情景下, 除中国、日本的茶适宜分布面积分别增加5.2%和31.5%外, 阿根廷、缅甸、越南、土耳其等国家适宜分布面积则会大幅减少, 且减少的比例要高于RCP2.6情景下的降幅(表3)。

不同的气候情景下, 茶适宜分布面积减少最多的10个国家基本一致, 主要是巴西、缅甸、玻利维亚、南非、孟加拉国、墨西哥等(图4a)。相比 RCP2.6 情景, RCP8.5情景下各个国家的茶适宜分布区会减少更多, 特别是巴西RCP8.5情景减少的适宜分布面积为RCP2.6情景的3.3倍(图4, 附录5, 6)。但是, 这些国家的实际产茶量存在巨大的差异。在RCP8.5情景下, 巴西、缅甸、墨西哥的适宜分布面积分别减少397,670 km<sup>2</sup>、138,656 km<sup>2</sup>和125,462 km<sup>2</sup>, 但是它们2016年的产茶量分别为447 t、102,404 t和0 t。

未来气候变化下, 茶适宜分布面积增加最多的国家主要是中国、加拿大、日本、新西兰、美国等(图4b)。相比RCP2.6情景, RCP8.5情景下各个国家新增的分布面积更多(图4b, 附录5, 6)。其中, 中国

和日本是目前仅有的两个产茶国家, 而其余的8个国家, 例如加拿大、美国、新西兰、挪威等并无产茶量(附录5, 6)。美国在不同的气候情景下茶适宜分布区的变化最大: 在RCP2.6情景下茶适宜分布面积会增加45,860 km<sup>2</sup>, 而RCP8.5的情景下则会减少72,289 km<sup>2</sup>。

**2.4 未来新增适宜分布区的来源**

RCP2.6和RCP8.5情景下, 全球范围内将分别新增9.1%和14.2%的茶适宜分布区, 但现有分布区将分别丧失18.6%和31.1% (表2)。这些新增的适宜分布区主要位于森林、草地和耕地(表4)。在RCP2.6情景下, 有46.9%的新增适宜分布区位于森林; 其次是耕地, 占20.0%; 草地15.9% (表4)。在RCP8.5情景下, 森林的占比则略小于RCP2.6情景, 为41.5%; 其次是草地, 占19.4%; 耕地占16.4% (表4)。

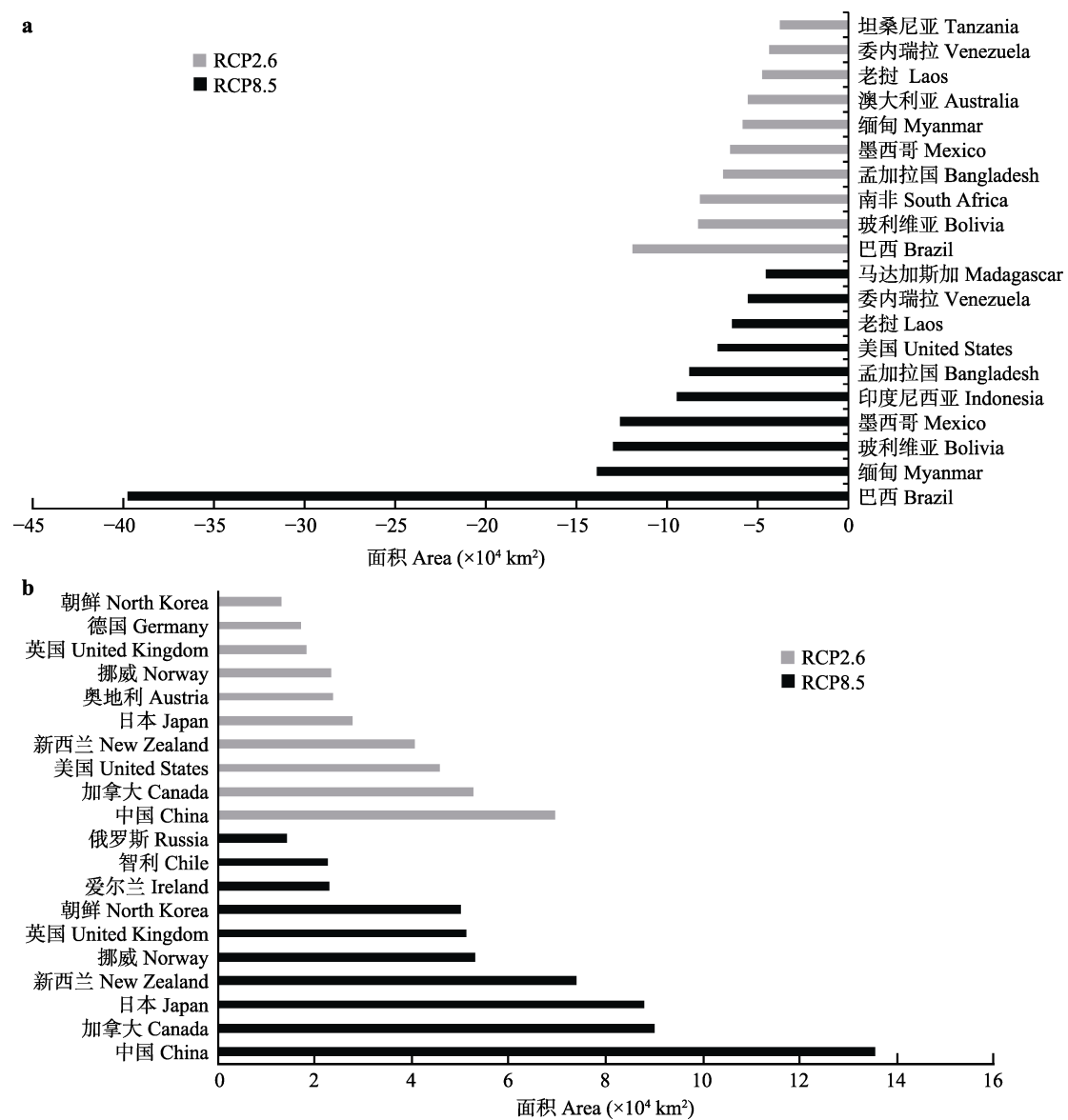
**3 讨论**

本研究利用全球茶分布数据和物种分布模型预测了全球茶的潜在适宜分布区及其在未来的变化。结果表明, 茶在五个大洲均有适宜分布区, 主要集中在亚洲、非洲和南美洲, 而最冷季平均温和夏季降水量主导了茶的分布。未来茶适宜分布区的变化在不同气候变化情景、不同大洲、不同国家均存在差异。未来气候变化情景下, 大部分国家的茶适宜分布区均会缩小, 虽然有些国家会因为温度升高或者降水增加而分布区增加, 但在这些新增适宜分布区中约有68%区域的原有土地覆盖类型是森林、灌木和草地等自然植被, 说明未来气候变化情

**表3 未来不同气候情景下主要产茶国家的适宜分布区面积变化**  
Table 3 Changes of suitable area in major tea-producing countries under different future climate scenarios

国家 Countries	当前适宜分布区 Current suitable area (km <sup>2</sup> )	适宜分布面积变化 Changes in suitable area (km <sup>2</sup> )		适宜分布面积变化比例 Changes in suitable area (%)		产量 (2016年) Production (t)
		RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5	
中国 China	2,607,924	69,384	135,088	2.7	5.2	2,414,802
印度 India	315,323	-9,241	-25,162	-2.9	-8.0	1,252,174
肯尼亚 Kenya	17,994	-4,470	-5,834	-24.8	-32.4	473,000
斯里兰卡 Sri Lanka	9,356	-232	-3,323	-2.5	-35.5	349,308
土耳其 Turkey	2,765	654	-1,619	23.7	-58.6	243,000
越南 Vietnam	75,599	-43,657	-55,005	-57.8	-72.8	240,000
印度尼西亚 Indonesia	260,214	-31,551	-94,931	-12.1	-36.5	144,015
缅甸 Myanmar	38,221	-28,938	-35,895	-75.7	-93.9	102,404
阿根廷 Argentina	32,876	-31,085	-31,503	-94.6	-95.8	89,609
日本 Japan	279,395	27,910	87,979	10.0	31.5	80,200





**图4** 未来气候变化下, 茶适宜分布区面积变化最多的前10个国家。(a)适宜分布区面积减少; (b)适宜分布区面积增加。  
**Fig. 4** Top ten countries with the largest changes in suitable area for tea under different future climate scenarios. (a) Loss suitable area; (b) Gain suitable area.

**表4** 不同未来气候情景下新增茶适宜分布区的来源  
**Table 4** The source of newly suitable areas for tea cultivation under different future climate scenarios

土地覆盖类型 Land cover	新增适宜分布区的来源 Source of newly suitable areas (%)	
	RCP2.6	RCP8.5
森林 Forest	46.9	41.5
灌木 Shrub	5.4	8.0
草地 Grassland	15.9	19.4
耕地 Farmland	20.0	16.4
建设用地 Urban	0.5	0.3
其他 Others	11.2	14.4

景下的茶产业发展可能会与自然植被及生物多样性保护产生冲突。总体而言, 未来全球茶的适宜分布区是减少的, 且RCP8.5情景下茶的生长将比RCP2.6情景面临更大的挑战。

### 3.1 影响茶分布的主要因子

我们的分析表明, 最冷季平均温和最暖季降水量是限制茶分布的最重要气候因子, 最暖月最高温和最干月降水量对茶分布的影响则较小。温度会直接影响茶树的光合作用速率、茶树的萌芽和展叶等过程(De Costa et al, 2007)。以往的研究认为, 茶起源于亚热带, 其生存主要取决于极端最低气温; 虽



然不同品种对低温的适应性略有差异,但通常当最低温度低于 $-10^{\circ}\text{C}$ 时,茶树无法存活(黄寿波, 1981; Han et al, 2018)。基于物种分布模型的模拟显示,在最冷季平均温低于 $0^{\circ}\text{C}$ 时,茶的适合度很低,这与茶生长的临界最低温度是一致的。本研究发现,未来中高纬度地区出现茶适宜分布区的扩张,如中国和日本的北部、加拿大以及欧洲地区。这可能是由于未来气候使得茶树能够度过冬季低温,从而适合茶树的种植。茶树的生长还需要适合的水分,当最暖季降水量不足500 mm或降水季节性大于100时,都不利于茶树的生长。Eden等(1965)认为成功栽培茶树的年降水量至少需要1,150 mm,而且要在季节间均匀分配;过少的降水加上季节分配不均以及蒸发、蒸腾过大,均会对茶树造成旱害。有研究发现,夏季高温和干旱会造成印度阿萨姆茶产区茶树干枯甚至死亡(Larson, 2015)。国际热带农业中心(CIAT)的研究发现,气候变化对肯尼亚和乌干达茶分布区内的适合度的影响在不同地点也不一致:最暖季降水量的增加可以解释67%的茶分布适宜性增加,而适宜性下降主要是由于温度季节性的下降导致的(Eitzinger et al, 2011a, b)。

茶树的生长还会受到光照、土壤、 $\text{CO}_2$ 浓度和病虫害的影响(黄寿波, 1981; Han et al, 2018)。以往研究表明,茶树适宜分布在酸性土壤里(Han et al, 2018),但本研究显示, pH值的大尺度格局对于茶的分布贡献很小。类似地, Yan等(2017)也发现土壤因子对青藏高原地区冬虫夏草分布的影响很小( $\leq 0.05$ )。这可能是由于在大尺度范围上,气候对茶树的分布的影响要远高于土壤pH,而土壤因子的作用可能主要体现在较小的局部尺度上。如何将土壤因子与物种分布模型更好地结合仍是一个难点。

气候变化也会改变害虫的分布和增加害虫的变异(Chang & Brattlof, 2015),从而影响茶的产量和品质,甚至导致茶树的死亡(Ahmed et al, 2014; Mukhopadhyay & Mondal, 2017)。Imbach等(2017)认为气候变化不仅会通过温度和降水的变化直接影响咖啡的分布,并且可以通过影响相关传粉昆虫的分布而间接影响咖啡的分布,明晰这些相互作用有利于气候变化下的咖啡种植管理。因此,要更准确地预测未来气候变化对茶树分布区的影响,还需要考虑相关害虫的影响,例如未来气候变化是否会更加适合害虫的生长,使得害虫的分布区增大。

### 3.2 未来气候变化对主要产茶国适宜分布区的影响及应对策略

在未来气候变化情景下,主要产茶国家中国、日本、韩国等将保持大部分原有的茶适宜分布区,并且出现茶适宜分布区的扩张,说明中国、日本等国的茶叶生产在未来可能会受益,在茶贸易市场会有更大的竞争优势。而其他国家的茶适宜分布区则出现不同程度的减少。阿根廷、缅甸、越南、肯尼亚等国家的茶适宜分布区,到2070年会减少24.8%–95.8%不等。这些国家的茶树种植园多数以个人或者家庭为单位。例如肯尼亚的小农户占60%(Han et al, 2018),而这些小农户没有能力应对气候变化对茶树种植的影响,因此在应对气候变化带来的挑战时,政府的参与是必不可少的。一方面,政府需要联合研究机构,从机理上探究气候变化包括温度升高、干旱加剧、 $\text{CO}_2$ 浓度升高等方面对茶树的影响,研发和培育更为耐旱和耐高温的品种;另一方面,政府要提高茶农们对气候变化的认识,发展可持续的农业生产,引导农户们放弃不适合种植茶的地区,改种其他合适的经济作物,采用多元化种植以减小损失。

此外,美国、加拿大、挪威、英国等非产茶国家也将有茶的适宜分布区,并且加拿大、挪威、英国的茶适宜分布区在未来还将大幅扩张。作为茶叶进口大国的美国,佛罗里达州立大学已经开始培育不同种类的茶树,以期能推广种植。但是物种分布模型主要考虑温度和降水等气候因子,忽略了生物相互作用(如害虫)和扩散等因素,往往会高估物种的分布区(Pineda & Lobo, 2009)。因此,对于加拿大、挪威、英国这些鲜有茶分布报道的国家,有关茶树种植的可行性还需要更多深入的研究。最后,对于巴西、玻利维亚等国家,实际的茶种植面积和产量较小,预测的当前适宜分布区较大,但在未来气候变化影响下适宜分布区又会缩小,因此新的茶树种植区最好位于现在和未来气候都适宜的地区,减少气候变化的影响。

### 3.3 气候变化下茶产业的发展与生物多样性保护的冲突

全球气候变化影响了茶树的适宜生长环境,改变了茶适宜分布区,导致茶产量下降,可能会加速新茶树种植园的开垦,使得经济发展与生物多样性保护产生矛盾。我们的研究发现,在未来新增的适

宜分布区中, 现有的土地利用/覆盖类型往往是森林等自然植被。例如RCP2.6情景下, 未来新增的适宜分布区中, 来自森林的面积占比为47%, 而来自耕地的面积只有20%。而且, 气候变暖可能会使茶适宜分布区向高海拔山区移动(Eitzinger et al, 2011), 而山区丰富的生物多样性为大量的野生动植物提供了栖息地, 茶分布区向高海拔扩张会侵占自然生境, 破坏动植物的栖息地, 与生物多样性保护产生冲突。此外, 气候变暖和干旱加剧需要更多的水资源用于降温和灌溉, 会加剧淡水资源的利用。因此, 在应对气候变化对小茶农和茶产业的影响时, 需要兼顾经济的发展与生物多样性保护两个目标, 发展可持续的茶种植产业, 谨慎开发新茶树种植园。

#### 4 结论和展望

本研究利用物种分布模型探讨了全球茶的潜在适宜分布区, 并且预测了2070年RCP2.6和RCP8.5两种气候情景下, 茶潜在适宜分布区的变化情况。结果表明, 最冷季均温和最暖季降水量是限制茶分布的重要气候因子, 茶主要分布在亚洲、非洲和南美洲。总体上, 未来气候变化下茶的潜在适宜分布区会缩小, 例如阿根廷、缅甸、越南、肯尼亚等国家; 而一些国家如中国和日本在未来茶的适宜分布区则会增大, 但新增大部分适宜分布区位于森林, 茶产业的发展可能会和自然植被及生物多样性保护产生矛盾, 需要引起重视。不同的国家的茶产业在应对气候变化时, 需要采取不同的应对策略, 并且考虑对生物多样性的影响, 发展可持续的茶种植产业。

**致谢:** 感谢北京大学宏观生态学研究组的 Nawal Shrestha 博士在文章写作过程中提出的宝贵意见。

#### 参考文献

Ahmed S, Stepp JR, Orians C, Griffin T, Matyas C, Robbat A, Cash S, Xue D, Long C, Unachukwu U, Buckley S, Small D, Kennelly E (2014) Effects of extreme climate events on tea (*Camellia sinensis*) functional quality validate indigenous farmer knowledge and sensory preferences in tropical China. *PLoS ONE*, 9, e109126.

Allouche O, Tsoar A, Kadmon R (2006) Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, Kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43,

1223–1232.

Araújo MB, Peterson AT (2012) Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology*, 93, 1527–1539.

Barbet-Massin M, Jiguet F, Albert CH, Thuiller W (2012) Selecting pseudo-absences for species distribution models: How, where and how many? *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 327–338.

Bartholome E, Belward AS (2005) GLC2000: A new approach to global land cover mapping from Earth observation data. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 1959–1977.

Campbell BM, Vermeulen SJ, Aggarwal PK, Corner-Dolloff C, Girvetz E, Loboguerrero AM, Ramirez-Villegas J, Rosentstock T, Sebastian L, Thornton PK, Wollenberg E (2016) Reducing risks to food security from climate change. *Global Food Security*, 11, 34–43.

Carr M (1972) The climatic requirements of the tea plant: A review. *Experimental Agriculture*, 8, 1–14.

Chang K, Brattlof M (2015) Socio-Economic Implications of Climate Change for Tea Producing Countries. Rome, FAO.

Chen L, Zhou ZX (2005) Variations of main quality components of tea genetic resources [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze] preserved in the China National Germplasm Tea Repository. *Plant Foods for Human Nutrition*, 60, 31–35.

Chen ZM, Chen L (2012) Delicious and healthy tea: An overview. In: *Global Tea Breeding. Advanced Topics in Science and Technology in China* (eds Chen L, Apostolides Z, Chen ZM), pp.1–11. Springer, Berlin, Heidelberg.

Cobos ME, Peterson AT, Barve N, Osorio-Olvera L (2019) kuenm: An R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 7, e6281.

Davis AP, Gole TW, Baena S, Moat J (2012) The impact of climate change on indigenous Arabica coffee (*Coffea arabica*): Predicting future trends and identifying priorities. *PLoS ONE*, 7, e47981.

De Costa W, Mohotti AJ, Wijeratne MA (2007) Ecophysiology of tea. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19, 299–332.

Dormann CF, Elith J, Bacher S, Buchmann C, Carl G, Carré G, Marquéz JRG, Gruber B, Lafourcade B, Leitão PJ, Münkemüller T, McClean C, Osborne PE, Reineking B, Schröder B, Skidmore AK, Zurell D, Lautenbach S (2013) Collinearity: A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36, 27–46.

Duncan J, Saikia S, Gupta N, Biggs E (2016) Observing climate impacts on tea yield in Assam, India. *Applied Geography*, 77, 64–71.

Eden T (1965) *Tea Tropical Agriculture Series*. Longman, London.

Eitzinger A, Läderach P, Quiroga A, Pantoja A, Gordon J (2011a) Future Climate Scenarios for Kenya's Tea Growing Areas. International Center for Tropical Agriculture (CIAT), Cali, Colombia.

- Eitzinger A, Läderach P, Quiroga A, Pantoja A, Gordon J (2011b) Future Climate Scenarios for Uganda's Tea Growing Areas. International Center for Tropical Agriculture (CIAT), Cali, Colombia.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2016) FAOSTAT Database. <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. (accessed on 2018-12-24)
- Gallien L, Münkemüller T, Albert CH, Boulangeat I, Thuiller W (2010) Predicting potential distributions of invasive species: Where to go from here? *Diversity and Distributions*, 16, 331–342.
- Han W, Li X, Yan P, Zhang L, Ahammed GJ (2018) Tea cultivation under changing climatic conditions. In: *Global Tea Science* (eds Sharma VS, Kumudini GMT), pp. 455–472. Burleigh Dodds Science Publishing Limited, Cambridge.
- Hannah L, Roehrdanz PR, Ikegami M, Shepard AV, Shaw MR, Tabor G, Zhi L, Marquet PA, Hijmans RJ (2013) Climate change, wine, and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 110, 6907–6912.
- Huang SB (1981) Agrometeorological index for tea growth. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2(3), 54–58. (in Chinese) [黄寿波 (1981) 茶树生长的农业气象指标. *农业气象*, 2(3), 54–58.]
- Huang SB, Fan XH, Yao GK (1993) Microclimate in tea tree crown and its effect on growth, development and biochemical composition of new shoots. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 4, 99–101. (in Chinese with English abstract) [黄寿波, 范兴海, 姚国坤 (1993) 丛栽茶树树冠小气候及其对新梢生育和生化成分的影响. *应用生态学报*, 4, 99–101.]
- Imbach P, Fung E, Hannah L, Navarro-Racines CE, Roubik DW, Ricketts TH, Harvey CA, Donatti CI, Laderach P, Locatelli B, Roehrdanz PR (2017) Coupling of pollination services and coffee suitability under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 114, 10438–10442.
- IPCC (2013) Climate change 2013: The physical science basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jin ZF, Yang D, Yao YP, Li RZ, Wang ZH (2016) Assessment on climatic potential productivity of tea in Zhejiang Province. *Chinese Journal of Ecology*, 35, 1791–1798. (in Chinese with English abstract) [金志凤, 杨栋, 姚益平, 李仁忠, 王治海 (2016) 浙江省茶叶气候生产潜力评估. *生态学杂志*, 35, 1791–1798.]
- Jin ZF, Ye JG, Yang ZQ, Sun R, Hu B, Li RZ (2014) Climate suitability for tea growing in Zhejiang Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 967–973. (in Chinese with English abstract) [金志凤, 叶建刚, 杨再强, 孙睿, 胡波, 李仁忠 (2014) 浙江省茶叶生长的气候适宜性. *应用生态学报*, 25, 967–973.]
- Larson C (2015) Reading the tea leaves for effects of climate change. *Science*, 348, 953–954.
- Li HM, Ma YX, Liu WJ, Liu WJ (2012) Soil changes induced by rubber and tea plantation establishment: Comparison with tropical rain forest soil in Xishuangbanna, SW China. *Environmental Management*, 50, 837–848.
- Liaw A, Wiener M (2002) Classification and regression by randomForest. *R News*, 2, 18–22.
- Lobell DB, Schlenker W, Costa-Roberts J (2011) Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333, 616–620.
- McCullagh P, Nelder JA (1989) *Generalized Linear Models*. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Mondal TK, Bhattacharya A, Laxmikumaran M, Ahuja PS (2004) Recent advances of tea (*Camellia sinensis*) biotechnology. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 76, 195–254.
- Mukhopadhyay M, Mondal TK (2017) *Cultivation, Improvement, and Environmental Impacts of Tea*. Oxford University Press, Oxford.
- Nemec-Boehm RL, Cash SB, Anderson BT, Ahmed S, Griffin TS, Oriens CM, Robbat AJ, Stepp RA, Han WY (2014) Climate change, the monsoon, and tea yields in China. *Agricultural and Applied Economics Association's 2014 AAEA Annual Meeting*, Minnesota.
- Nowogrodzki A (2019) How climate change might affect tea. *Nature*, 566, S10.
- Ochieng J, Kirimi L, Mathenge M (2016) Effects of climate variability and change on agricultural production: The case of small scale farmers in Kenya. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 77, 71–78.
- Ovalle-Rivera O, Laderach P, Bunn C, Obersteiner M, Schroth G (2015) Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. *PLoS ONE*, 10, e0124155.
- Owuor PO, Wachira FN, Ng'etich WK (2010) Influence of region of production on relative clonal plain tea quality parameters in Kenya. *Food Chemistry*, 119, 1168–1174.
- Parry M, Canziani O, Palutikof J, van der Linden PJ, Hanson CE (2007) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Pearson RG, Dawson TP (2003) Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: Are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography*, 12, 361–371.
- Peterson AT, Papeş M, Soberón J (2008) Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213, 63–72.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.
- Pineda E, Lobo JM (2009) Assessing the accuracy of species distribution models to predict amphibian species richness patterns. *Journal of Animal Ecology*, 78, 182–190.
- R Core Team (2017) *R: A Language and Environment for*

- Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>. (accessed on 2019-01-13)
- Schmidhuber J, Tubiello FN (2007) Global food security under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 104, 19703–19708.
- Schroth G, Läderach P, Martinez-Valle AI, Bunn C, Jassogne L (2016) Vulnerability to climate change of cocoa in West Africa: Patterns, opportunities and limits to adaptation. Science of the Total Environment, 556, 231–241.
- Thuiller W, Lafourcade B, Engler R, Araújo MB (2009) BIOMOD—A platform for ensemble forecasting of species distributions. Ecography, 32, 369–373.
- Wijeratne M, Anandacoomaraswamy A, Amarathunga M, Ratnasiri J, Basnayake B, Kalra N (2007) Assessment of impact of climate change on productivity of tea (*Camellia sinensis* L.) plantations in Sri Lanka. Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka, 35, 119–126.
- Wu TW, Song LC, Li WP, Wang ZZ, Zhang H, Xin XG, Zhang YW, Zhang L, Li JL, Wu FH (2014) An overview of BCC climate system model development and application for climate change studies. Journal of Meteorological Research, 28, 34–56.
- Yan YJ, Li Y, Wang WJ, He JS, Yang RH, Wu HJ, Wang XL, Jiao L, Tang ZY, Yao YJ (2017) Range shifts in response to climate change of *Ophiocordyceps sinensis*, a fungus endemic to the Tibetan Plateau. Biological Conservation, 206, 143–150.
- Zhu GP, Fan JY, Wang ML, Chen M, Qiao HJ (2017) The importance of the shape of receiver operating characteristic (ROC) curve in ecological model evaluation—Case study of *Hlyphantria cunea*. Journal of Biosafety, 26, 184–190. (in Chinese with English abstract) [朱耿平, 范靖宇, 王梦琳, 陈敏, 乔慧捷 (2017) ROC曲线形状在生态位模型评价中的重要性——以美国白蛾为例. 生物安全学报, 26, 184–190.]

(责任编辑: 张大勇 责任编辑: 时意专)

## 附录 Supplementary Material

### 附录1 本文所用茶分布点的经纬度坐标

Appendix 1 The coordinate of tea occurrence in the present paper

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019085-1.xlsx>

### 附录2 不同茶分布数据预测的现在和未来RCP2.6和RCP8.5情景下全球茶分布的适宜度

Appendix 2 Predicted suitability of tea distribution using different tea occurrence data under current and different future climate scenarios (RCP2.6 and RCP8.5)

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019085-2.pdf>

### 附录3 环境变量的Pearson相关系数矩阵

Appendix 3 Pearson correlation coefficient matrix between environmental variables

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019085-3.pdf>

### 附录4 基于GLC2000土地覆盖类型的重新分类

Appendix 4 Reclassification of the land cover types based on GLC2000

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019085-4.pdf>

### 附录5 RCP2.6情景下适宜分布区面积减少和增加最多的10个国家

Appendix 5 Top ten countries with the largest changes in suitable area for tea under the climate scenarios of RCP2.6

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019085-5.pdf>

### 附录6 RCP8.5情景下适宜分布区面积减少和增加最多的10个国家

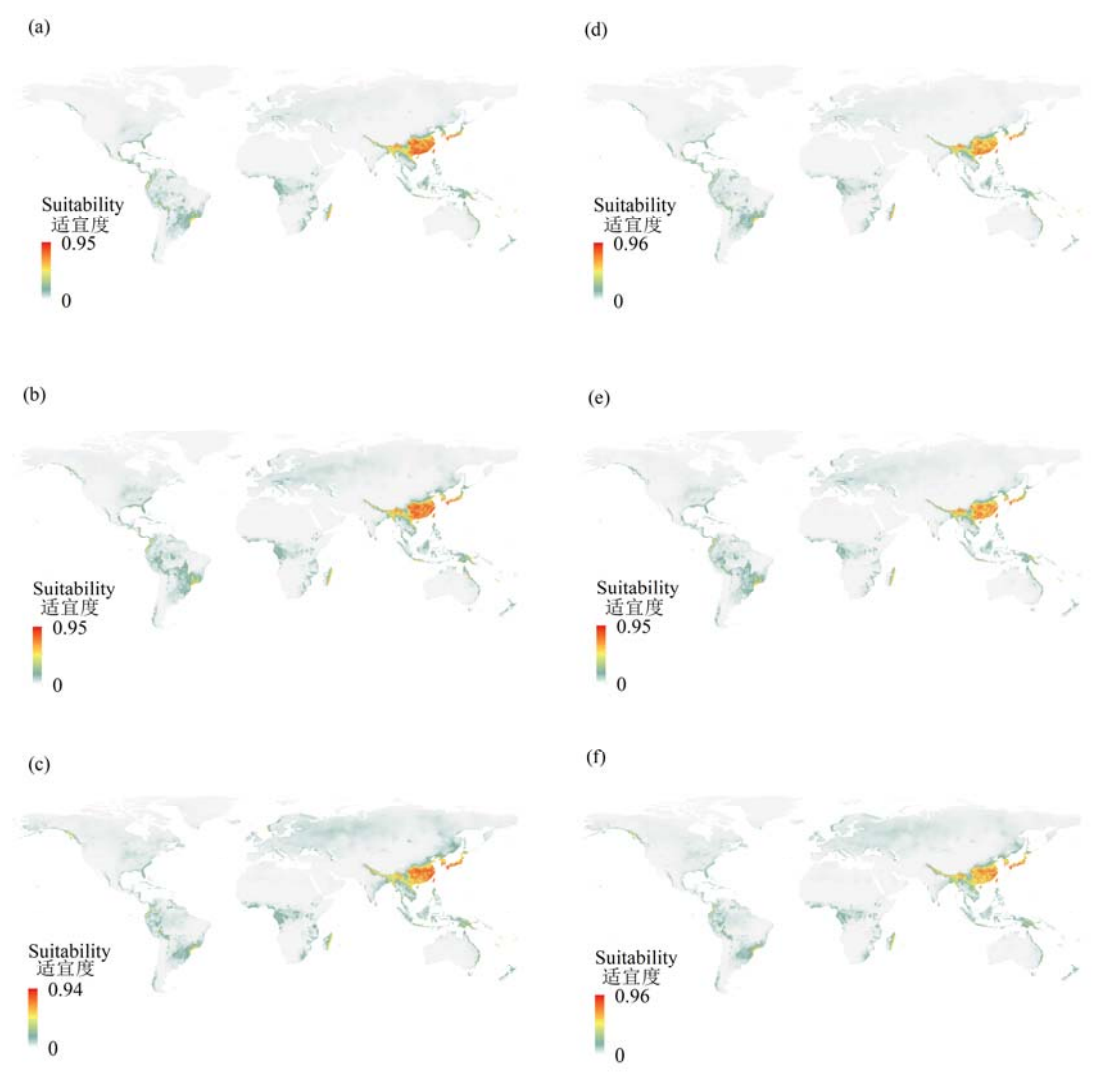
Appendix 6 Top ten countries with the largest changes in suitable area for tea under the climate scenarios of RCP8.5

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019085-6.pdf>



张晓玲, 李亦超, 王芸芸, 蔡宏宇, 曾辉, 王志恒. 未来气候变化对不同国家茶适宜分布区的影响. 生物多样性, 2019, 27(6): 595–606.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019085>



附录2 不同茶分布数据预测的现在和未来RCP2.6和RCP8.5情景下全球茶分布的适宜度。图(a)、(b)和(c)是利用全部的茶分布数据预测的现在、RCP2.6和RCP8.5情景下茶分布适宜度；图(d)、(e)和(f)是随机去除中国一半的茶分布数据预测的现在、RCP2.6和RCP8.5情景下茶分布适宜度。

Appendix 2 Predicted suitability of tea distribution using different tea occurrence data under current and different future climate scenarios (RCP2.6 and RCP8.5). (a), (b), and (c) Predicted suitability using all tea occurrence data under current and two future climate scenarios (RCP2.6 and RCP8.5); (d), (e), and (f) Predicted suitability using half of tea occurrence data in China under current and two future climate scenarios (RCP2.6 and RCP8.5).

张晓玲, 李亦超, 王芸芸, 蔡宏宇, 曾辉, 王志恒. 未来气候变化对不同国家茶适宜分布区的影响. 生物多样性, 2019, 27(6): 595–606.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019085>

附录3 环境变量的Pearson相关系数矩阵

Appendix 3 Pearson correlation coefficient matrix between environmental variables

	MTCQ	PWQ	PS	MDTR	MTWM	PDM	Soil pH
MTCQ	1						
PWQ	0.71	1					
PS	0.43	0.79	1				
MDTR	0.37	0.14	0.12	1			
MTWM	0.51	0.43	0.32	0.52	1		
PDM	0.20	0.02	0.26	0.56	0.10	1	
Soil pH	0.37	0.28	0.076	0.33	0.22	0.39	1

MTCQ: 最冷季平均温; PWQ: 最暖季降水量; PS: 降水季节性; MDTR: 平均日较差; MTWM: 最暖月最高温; PDM: 最干月降水量; Soil pH: 土壤酸碱度。

MTCQ, Mean temperature of coldest quarter; PWQ, Precipitation of warmest quarter; PS, Precipitation seasonality; MDTR, Mean diurnal temperature range; MTWM, Max temperature of warmest month; PDM, Precipitation of driest month.

张晓玲, 李亦超, 王芸芸, 蔡宏宇, 曾辉, 王志恒. 未来气候变化对不同国家茶适宜分布区的影响. 生物多样性, 2019, 27(6): 595–606.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019085>

#### 附录4 基于GLC2000土地覆盖类型的重新分类

##### Appendix 4 Reclassification of land cover types based on GLC2000

土地覆盖类型	重新分类
Land cover	Reclassification
森林覆盖, 阔叶, 常绿 Tree cover, broadleaved, evergreen	森林 Forest
森林覆盖, 阔叶, 落叶, 郁闭 Tree cover, broadleaved, deciduous, closed	
森林覆盖, 阔叶, 落叶, 稀疏 Tree cover, broadleaved, deciduous, open	
森林覆盖, 针叶, 常绿 Tree cover, needle-leaved, evergreen	
森林覆盖, 针叶, 落叶 Tree cover, needle-leaved, deciduous	
森林覆盖, 混合叶型 Tree cover, mixed leaf type	
森林覆盖, 洪水淹没, 淡水 Tree cover, regularly flooded, fresh water	
森林覆盖, 洪水淹没, 咸水 Tree cover, regularly flooded, saline water	灌木 Shrub
镶嵌: 森林覆盖/ 其他自然植被 Mosaic: tree cover / other natural vegetation	
森林覆盖, 烧毁 Tree cover, burnt	
灌木覆盖, 郁闭, 常绿 Shrub cover, closed-open, evergreen	
灌木覆盖, 稀疏, 落叶 Shrub cover, closed-open, deciduous	草地 Grassland
草本覆盖, 郁闭–稀疏 Herbaceous cover, closed-open	
稀疏草本或灌木覆盖 Sparse herbaceous or sparse shrub cover	
洪水淹没的灌木和草本覆盖 Regularly flooded shrub and/or herbaceous cover	
种植和管理用地 Cultivated and managed areas	耕地 Farmland
斑块: 耕地/森林覆盖/其他自然植被 Mosaic: cropland/tree cover/other natural vegetation	
斑块: 耕地/灌木和草地覆盖 Mosaic: cropland/shrub and/or grass cover	
人工地表和相关用地 Artificial surfaces and associated areas	城市用地 Urban
裸地 Bare areas	
水体 Water bodies	其他 Others
冰雪 Snow and ice	
灌溉农业 Irrigated agriculture	

张晓玲, 李亦超, 王芸芸, 蔡宏宇, 曾辉, 王志恒. 未来气候变化对不同国家茶适宜分布区的影响. 生物多样性, 2019, 27(6): 595–606.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019085>

附录5 RCP2.6情景下适宜分布区面积减少和增加最多的10个国家  
Appendix 5 Top ten countries with the largest changes in suitable area for tea under the climate scenarios of RCP2.6

国家	适宜分布区面积				产量(2016 年)
Countries	Suitable area(km²)				Production(t)
	现代	RCP2.6	净变化	净变化比例	
	Current		Net changes	Net changes(%)	
适宜分布区减少					
巴西	739,036	620,204	-118,832	-16.1	447
玻利维亚	136,026	53,232	-82,795	-60.9	102,404
南非	139,909	57,868	-82,041	-58.6	1,251
孟加拉国	96,937	28,099	-68,839	-71.0	-
墨西哥	156,377	91,608	-64,769	-41.4	144,015
缅甸	276,391	217,706	-58,685	-21.2	64,500
澳大利亚	200,100	144,697	-55,403	-27.7	-
老挝	130,452	83,055	-47,397	-36.3	7,300
委内瑞拉	75,599	31,942	-43,658	-57.8	-
坦桑尼亚	57,717	19,770	-37,946	-65.7	387
适宜分布区增加					
中国	2,607,924	2,677,308	69,430	2.7	2,414,802
加拿大	40,873	93,616	52,742	129.0	-
美国	258,278	304,138	45,860	17.8	-
新西兰	60,411	101,156	40,745	67.5	-
日本	279,395	307,305	27,910	10.0	80,200
奥地利	1,204	24,857	23,653	1964.5	-
挪威	5,867	29,296	23,429	399.3	-
英国	21	18,118	18,098	86181.0	-
德国	833	18,163	17,330	2080.4	-
朝鲜	14,589	27,886	13,297	91.1	-



张晓玲, 李亦超, 王芸芸, 蔡宏宇, 曾辉, 王志恒. 未来气候变化对不同国家茶适宜分布区的影响. 生物多样性, 2019, 27(6): 595–606.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019085>

**附录6 RCP8.5情景下适宜分布区面积减少和增加最多的10个国家**  
Appendix 6 Top ten countries with the largest changes in suitable area for tea under the climate scenarios of RCP8.5

国家	适宜分布区面积				产量(2016 年)
Countries	Suitable area(km² )				Production(t)
	现代	RCP8.5	净变化	净变化比例	
	Current		Net changes	Net changes(%)	
适宜分布区减少					
巴西	739,036	341,366	-397,670	-53.8	447
缅甸	276,391	137,735	-138,656	-50.2	102,404
玻利维亚	136,026	6,029	-129,997	-95.6	1,251
墨西哥	156,377	30,915	-125,462	-80.2	-
印度尼西亚	260,214	165,283	-94,931	-36.5	144,015
孟加拉国	96,937	8,970	-87,968	-90.8	64,500
美国	258,278	185,989	-72,289	-28.0	-
老挝	130,452	65,965	-64,487	-49.4	7,300
委内瑞拉	75,599	20,594	-55,005	-72.8	-
马达加斯加	220,289	174,659	-45,630	-20.7	387
适宜分布区增加					
中国	2,607,924	2,743,012	135,088	5.2	2,414,802
加拿大	40,873	131,092	90,219	220.7	-
日本	279,395	367,374	87,979	31.5	80,200
新西兰	60,411	134,513	74,102	122.7	-
挪威	5,867	58,801	52,934	902.2	-
英国	21	51,423	51,402	244,771.4	-
朝鲜	14,589	64,769	50,180	344.0	-
俄罗斯	955	24,072	23,117	2,420.6	-
爱尔兰	247	23,021	22,774	9,220.2	-
莱索托	3,629	17,921	14,292	393.8	-