

引文格式: 李应军, 吴鹏, 董莉, 等. 基于 MaxEnt 模型的干巴菌云南适生区预测[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(5): 74–86. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202405039](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202405039)

基于 MaxEnt 模型的干巴菌云南适生区预测*

李应军¹, 吴 鹏², 董 莉³, 李杰庆^{1**}

(1. 云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201; 2. 云南农业大学 云南省高原特色农业产业研究院, 云南 昆明 650201; 3. 云南省绿色食品发展中心, 云南 昆明 650225)

摘要:【目的】明确干巴菌在云南的适生区, 并探讨未来气候变化对其分布及生境适宜性的影响。【方法】采用主成分分析法对气候因子、土壤因子进行降维处理, 将筛选后的生态因子输入最大熵 (maximum entropy, MaxEnt) 模型, 对干巴菌适生区进行预测, 使用刀切法 (Jackknife) 和响应曲线确定影响物种分布的关键生态因子和适宜阈值范围; 采用 ArcGIS 对预测结果进行空间统计分析和适生等级划分, 研究未来气候条件下干巴菌分布范围的变化趋势。【结果】MaxEnt 模型训练集和测试集的受试者工作特征曲线下面积分别为 0.884 和 0.911, 表明模型预测结果可靠。刀切分析结果显示: 年降水量、等温性和坡度是影响干巴菌分布最为关键的因子。未来气候变化将影响干巴菌的分布, 与当前相比, 在 SSP126 情景下, 21 世纪末 (2090s) 的干巴菌云南适宜生境丧失和新增面积分别为 1.09×10^4 和 2.60×10^3 km²; 在 SSP370 情景下, 丧失和新增面积分别为 1.21×10^4 和 5.20×10^3 km²。【结论】未来气候变化将导致云南境内的干巴菌适生区面积减小, 其中滇中地区受气候变化的影响最为严重。

关键词: 干巴菌; 生境适宜性; 地理分布; 气候变化; MaxEnt 模型

中图分类号: S567.3019

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2024) 05-0074-13

Prediction of Suitable Habitat of *Thelephora ganbajun* in Yunnan Based on MaxEnt Model

LI Yingjun¹, WU Peng², DONG Li³, LI Jieqing¹

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Yunnan Plateau Characteristic Agricultural Industry Research Institute, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3. Yunnan Green Food Development Center, Kunming 650225, China)

Abstract: [Purpose] To clarify the suitable habitat of *Thelephora ganbajun* in Yunnan, and to explore the effects of future climate change on the distribution and habitat suitability of this species.

[Methods] The dimension of soil and climate components was reduced using principal component analysis, and the selected ecological factors were input into the maximum entropy (MaxEnt) model to predict suitable habitat of *T. ganbajun*. Knife cutting method (Jackknife) and response curve were used to identify the key ecological factors and suitable threshold range influencing species distribution. ArcGIS was used to carry out spatial statistical analysis and fitness classification, and to study the changing trend of species distribution range under future climatic conditions. [Results] The

收稿日期: 2024-05-28

修回日期: 2024-10-10

网络首发日期: 2024-10-31

*基金项目: 云南省科技厅科技计划农业联合面上项目 (202301BD070001-167)。

作者简介: 李应军 (1994—), 男, 云南玉溪人, 在读硕士研究生, 主要从事食用菌栽培研究。

E-mail: 1056590731@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 李杰庆 (1982—), 男, 江西彭泽人, 博士, 副教授, 主要从事食用菌资源评价研究。E-mail: lijieqing2008@126.com

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20241030.1722.010>



area under curve (AUC) of the training set and test set of the MaxEnt model was 0.884 and 0.911, respectively. Jackknife analysis showed that annual precipitation, isothermality and slope were the key factors affecting the species distribution of *T. ganbajun*. The distribution of the species would be affected by climate change in the future. Compared to the present, by the 21st century (2090s), under the SSP126 scenario, the suitable habitat loss and the new area of *T. ganbajun* in Yunnan was 1.09×10^4 and 2.60×10^3 km², respectively; under the SSP370 scenario, the loss and the new area of suitable habitats for *T. ganbajun* was 1.21×10^4 km² and 5.20×10^3 km², respectively. [**Conclusion**] Future climate change will result in a reduction of the suitable area for *T. ganbajun* in Yunnan, with the central Yunnan region being the most severely affected by climate change.

Keywords: *Thelephora ganbajun*; habitat suitability; geographic distribution; climate change; Max-Ent model

干巴菌 (*Thelephora ganbajun*) 是云南珍稀名贵野生菌, 隶属于担子菌门 (Basidiomycotina) 伞菌纲 (Agaricomycetes) 革菌目 (Thelephorales) 革菌科 (Thelephoraceas) 革菌属 (*Thelephora*)^[1-3]。其子实体初期菌肉柔软, 成熟后菌肉坚韧、呈纤维质, 因具有酷似腌牛肉干的浓郁气味而得名干巴菌。干巴菌具有较高的食用和药用价值, 其子实体富含维生素、蛋白质、氨基酸、黄酮、多糖、硒等营养物质和有益矿质元素^[4-5]。野外干巴菌主要与云南松 (*Pinus yunnanensis*)、马尾松 (*P. massoniana*)、思茅松 (*P. kesiya* var. *langbianensis*) 等针叶树种形成共生关系^[6-7]。因该物种共生机制不明, 子实体组织分离提纯难度大等原因, 目前无法实现人工栽培, 导致市场商品仍然依赖野生采摘。云南是中国的干巴菌主产区, 由于干巴菌市场需求量大、经济价值高, 其野生资源被过度采掘, 导致云南干巴菌产量逐年减少, 资源保护迫在眉睫。

除人为活动干扰外, 全球气候变化、极端气候事件频发也可能进一步威胁野生干巴菌的生存。联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 发布的第6次评估报告最新综合报告指出: 2011—2020年, 人类活动导致地球表面温度迅速上升, 全球平均温度较工业革命前 (1850—1900年) 升高约1.10℃, 极端降水、升温、干旱事件发生频率也进一步上升^[8]。物种分布模型 (species distribution models, SDMs) 是研究气候变化对物种分布影响的重要研究工具, 可通过结合已知物种分布记录和生态因子数据, 建立物种分布与生态因子之间的关系模型, 模拟物种在空间上和时间上的分布

变化, 从而协助了解物种生态需求及地理分布规律^[9]。随机森林 (random forest, RF) 模型、生态位因子分析 (ecological niche factor analysis, ENFA) 模型、规则集遗传算法 (genetic algorithm for rule-set prediction, GARP) 模型、广义线性模型 (generalized linear model, GLM)、生物气候分析系统 (bioclimate analysis and prediction system, BIOCLIM)、最大熵 (maximum entropy, MaxEnt) 模型等是目前研究较多的 SDMs^[10-13]。其中, MaxEnt 模型预测精度高, 在珍稀濒危物种保护、野生动植物生境质量评价、外来物种入侵与防控、植物病虫害评估管理等方面均发挥着积极作用^[14-16]。

李尤等^[17]基于 MaxEnt 模型对不同气候情景下白蜡树 (*Fraxinus chinensis*) 在中国的适生区进行预测, 发现随着温度升高、降雨量减少和二氧化碳排放量升高, 该物种的适宜生境面积将减少, 并呈现向西南方向迁移的变化趋势。在真菌研究领域, SHRESTHA 等^[18]利用 MaxEnt 模型探讨了气候变化对喜马拉雅山脉冬虫夏草 (*Chinese cordyceps*) 分布的影响, 发现随着气候变化, 冬虫夏草适生区的平均海拔可能升高且面积减小。曹槟等^[19]利用 MaxEnt 预测中华美味蘑菇 (*Agaricus sinodeliciosus*) 的适生区, 为该物种地理分布规律的科学认识提供了理论依据。CAO 等^[20]利用 MaxEnt 研究了羊肚菌 (*Morchella esculenta*) 当前和未来适宜生境的变化规律, 筛选了限制物种分布的关键生态因子, 为野生羊肚菌的资源保护提供了理论依据。对桑黄 (*Sanghuangporus lonicericola*) 的研究则发现: 气候变化可能增加该类药用真菌的适宜分布范围, 但适生区质心可能发生转移^[21]。国内学者还利用 MaxEnt 研究了蒙古

白丽蘑 (*Leucocalocybe mongolica*) 的地理分布格局, 并探讨了该食用菌在中国和蒙古国适生区面积变化的可能原因^[22]。以上研究均表明: MaxEnt 在野生菌资源保护和气候变化风险评估方面发挥着积极作用。

本研究针对干巴菌野生资源保护与可持续利用问题, 运用 SDMs 相关理论和方法, 结合当前干巴菌的分布数据, 探讨温度、降水、地形、土壤等因子对其分布的限制性作用, 并预测未来不同气候情景下该物种在云南境内的分布变化。研究结果可为深入认识该物种的地理分布格局、产地环境特征以及科学评估气候变化对其威胁程度提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

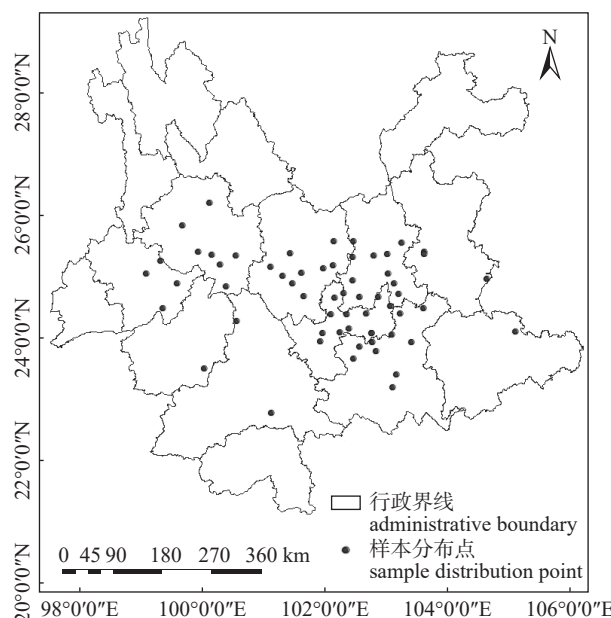
云南地处中国西南部, 面积约 $3.94 \times 10^5 \text{ km}^2$, 大部分位于云贵高原, 区域平均海拔大于 1 000 m, 地貌复杂, 涵盖高山、丘陵、盆地、峡谷等多种地形^[23]。由于海拔和纬度变化的综合作用, 云南立体气候显著, 有热带、亚热带、亚高山温带、高山寒带等多种植被类型; 加之长期受印度洋和太平洋暖湿气流的影响, 云南全省雨量充沛, 是野生菌的主要栖息地^[24-25]。

1.2 试验数据及其来源

1.2.1 物种分布数据

干巴菌在云南主要分布于昆明、楚雄、玉溪和曲靖, 其次为丽江、大理和保山; 此外, 湖北、贵州、四川有少量分布记载^[26]。干巴菌主要生长于海拔 1 000~2 000 m 的松树林中, 其分布区地理位置位于 $22^\circ \sim 27^\circ \text{ N}$, $99^\circ \sim 106^\circ \text{ E}$ ^[27]。本研究主要探讨云南区域气候条件对干巴菌地理分布影响。物种分布数据包括: (1) 野外实地调查与 GPS 定位记录干巴菌生长点坐标位置; (2) 对全球生物多样性信息机构 (Global Biodiversity Information Facility, GBIF, <https://www.gbif.org>) 物种分布数据库、中国虚拟植物标本馆 (<https://www.cvh.ac.cn>)、中国科学院微生物研究所菌物标本馆 (<http://nmde.cn/fungarium/>) 和国际农业与生物科学研究中心 (Centre for Agriculture and Bioscience International, CABI, <http://www.cabi.org/cpci/>) 数据库进行检索, 获取干巴菌分布的坐标; (3) 检索国内外发布的文献报道, 进一步补

充干巴菌分布点数据。对于文献检索中未明确详细地理坐标点的数据, 使用谷歌地球和百度地图进行反复筛查, 对分布点位置进行校对。将检索初步获取的 117 组干巴菌分布点数据录入 EN-Mtools 工具包, 剔除重复数据和无效数据; 在 ArcGIS 中设置缓冲半径 (5.0 km), 筛选后改善分布点空间分布的均匀性, 避免由于分布点数据空间自相关而引发的环境偏差和过拟合。经过筛选, 最终保留 61 个干巴菌分布点, 并将其保存为 CSV 格式, 用于后续建模分析 (图 1)。



注: 底图源自 2020 版标准地图且无修改, 审图号: GS (2020) 4619 号; 下同。

Note: Base map from the 2020 version of the standard map, and without modification, review No.: GS (2020) 4619; the same as below.

图 1 干巴菌建模物种分布点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the distribution points of the modeled species of *Thelephora ganbajun*

1.2.2 气候因子数据

气候因子数据来源于世界气象数据库 (Worldclim, <http://www.worldclim.org/>), 包括 19 个生物气候因子 (表 1)。当前气候数据为 1970—2000 年气候数据的平均值, 采用插值法生成全球气候栅格数据。未来气候数据主要涉及 2 种情景模式 (SSP126 和 SSP370) 和 4 个时间段 (2021—2040 年、2041—2060 年、2061—2080 年和 2081—2100 年), 数据空间分辨率为 $30''$ 。未来时期数据采用 IPCC 第 6 次评估报告发布的 BCC-CSM2-MR 模式下的共享社会经济路径气候情景数据。BCC-

CSM2-MR 被广泛应用于东亚大陆的气候变化与物种分布研究, SSP126 和 SSP370 分别表示碳排放由低到高的未来气候情景。SSP126 情景下, 全球 CO₂ 排放量大幅度减少, 到 21 世纪末, 全球气温平均上升 1.8 ℃; SSP370 情景下, 全球 CO₂ 排放量大幅度增加, 到 21 世纪末, 全球气温上升 3.6 ℃。

表 1 生物气候因子
Tab. 1 Biological climate factors

代码 code	描述 description
Bio1	年平均温度 annual mean temperature
Bio2	平均温度日较差 mean diurnal air temperature rang
Bio3	等温性 isothermality [(Bio2/Bio7)]×100
Bio4	温度季节变化 temperature seasonality
Bio5	最热月最高温度 max temperature of warmest month
Bio6	最冷月最低温度 min temperature of coldest month
Bio7	温度年较差 temperature annual range (Bio5–Bio6)
Bio8	最湿季平均温度 mean temperature of wettest quarter
Bio9	最干季平均温度 mean temperature of driest quarter
Bio10	最热季平均温度 mean temperature of warmest quarter
Bio11	最冷季平均温度 mean temperature of coldest quarter
Bio12	年降水量 annual precipitation
Bio13	最湿月降水量 precipitation of wettest month
Bio14	最干月降水量 precipitation of driest month
Bio15	降水季节性 precipitation seasonality (coefficient of variation)
Bio16	最湿季降水量 precipitation of wettest quarter
Bio17	最干季降水量 precipitation of driest quarter
Bio18	最热季降水量 precipitation of warmest quarter
Bio19	最冷季降水量 precipitation of coldest quarter

1.2.3 地形数据

根据干巴菌的生活习性, 综合考虑气候、土壤、坡度、海拔、坡向、地形、植被等环境因子对干巴菌生长的影响, 选取海拔、坡度和坡向 3 个地形因子进行建模分析, 数据来源于中国科学院数据库地里空间数据云平台 (<https://www.gs-cloud.cn>) 的数字高程图 (DEM), 分辨率为 90 m×90 m。使用 ArcGIS 进行空间分析和掩膜提取, 获取云南省地形因子数据。

1.2.4 土壤数据

土壤的砂粒、黏粒、酸碱度和有机质数据均来自国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/>) 以及联合国粮农组织和维也纳国际应用系统研究所构建的世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database, HWSO), 中国境内数据源为第二次全国土地调查中国科学院南京土壤研究所提供

的 1 : 100 万土壤数据。

1.3 研究方法

1.3.1 生物气候、地形和土壤因子数据处理

在 ArcGIS 10.2 中导入 19 个生物气候因子的栅格数据, 使用 ArcGIS 10.2 从数字高程图 (DEM) 中提取海拔、坡度和坡向的栅格数据, 并将土壤数据文件转为栅格数据; 采用掩膜提取的方法, 按照云南边界对上述栅格数据进行裁剪, 并进行定义投影, 将坐标系定义为 WGS_1984 的地理坐标系, 使用重采样的方法将栅格像元定义为同样大小; 通过栅格转 ASCII 工具将栅格数据转为 MaxEnt 所需要的.asc 文件。

1.3.2 MaxEnt 模型建模

在 MaxEnt 模型 (版本 3.4.4) 中导入物种的地理位置数据 (.csv 格式) 和环境变量数据 (.asc 格式), 使用刀切法评估各环境因子的重要性; 结合主成分分析法, 对主导因子进行筛选。在 Max-Ent 模型中选取 75% 的随机样本分布点用于训练模型, 其余 25% 用于验证集, 使用受试者工作特征 (receive operator characteristic, ROC) 与横坐标围成的面积, 即 ROC 曲线下面积 (the area under curve, AUC), 评价模型预测结果的准确度。AUC 值在 0~1 之间, AUC 值越接近于 1, 表明模型预测结果越可靠。AUC 的评价标准为: 0.50≤AUC<0.60, 表示模拟效果失败; 0.60≤AUC<0.70, 表示模拟效果较差; 0.70≤AUC<0.80, 表示模拟效果良好; 0.80≤AUC<0.95, 表示模拟效果较好; 0.95≤AUC<1.0, 表示模拟效果极好。重复运行模型 10 次, 选择 AUC 值最高的模型作为最终预测结果。

1.3.3 适生区划分

使用 ArcGIS 10.2 对 MaxEnt 模型的运行结果进行等级划分, 使用自然间断点分级法将其划分为 4 个等级, 分别为不适宜区、低适宜区、中适宜区和高适宜区。

2 结果与分析

2.1 模型预测结果评价

经筛选, 保留 Bio1 (年平均温度)、Bio3 (等温性)、Bio11 (最冷季平均温度)、Bio12 (年降水量)、Bio14 (最干月降水量)、Bio15 (降水季节性)、Bio16 (最湿季降水量)、Bio17 (最干季降水量)、坡度、坡向、海拔、土壤有机质、pH、粉砂

率、沙土率和黏土率共 16 个对于干巴菌生长有影响的生态因子用于建模。将 16 个因子输入 Max-Ent 模型中, 运行结果 (图 2) 显示: 训练集 AUC 为 0.884, 测试集 AUC 为 0.911, 表明模型预测效果好, 且基于初始环境因子构建的模型适用于干巴菌适生区的模拟。

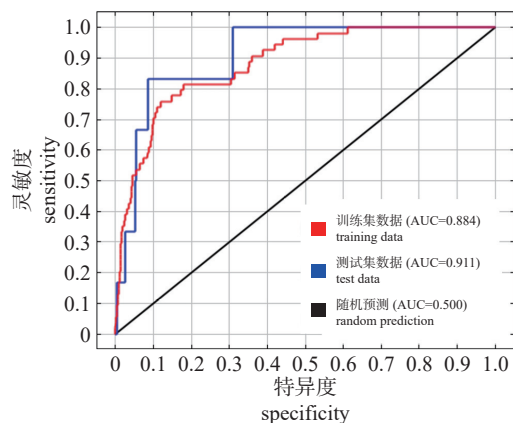


图 2 干巴菌潜在分布区域模拟的受试者工作特征 (ROC) 曲线及曲线下面积 (AUC)

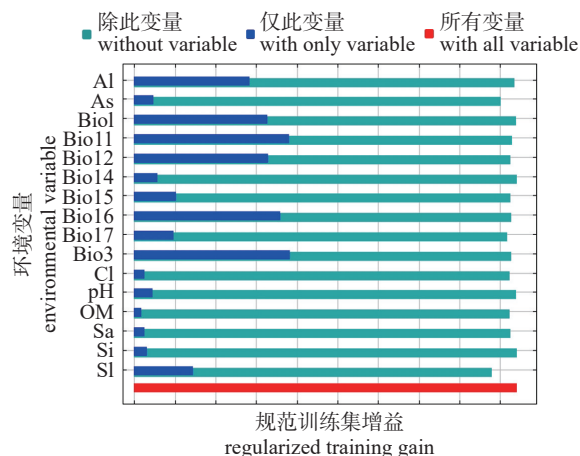
Fig. 2 Receive operator characteristic (ROC) curves and the area under curve (AUC) of the simulation results of *T. ganbajun* potential distribution area

2.2 各生物气候变量对干巴菌分布的重要性

通过 MaxEnt 模型的刀切法对生态因子进行增益验证, 结合刀切法的重要性测试结果 (图 3), 筛选出累计贡献率大于 90% 且贡献率不低于 3% 的因子。验证结果表明: Bio12 (年降水量)、Bio3 (等温性)、坡度、Bio16 (最湿季降水量)、Bio11 (最冷季平均温度)、坡向、Bio17 (最干季降水量) 和 Bio1 (年平均温度) 的建模贡献率分别为 28.9%、18.2%、14.0%、9.7%、7.1%、6.0%、5.5% 和 3.1%, 置换重要性分别为 37.0%、5.0%、7.3%、7.8%、6.2%、7.8%、13.9% 和 0.7%, 上述因子累计贡献率为 92.5%, 各因子相关系数小于 0.8, 因此, 这 8 个生态因子是干巴菌适生区预测的关键因子。

2.3 各生物气候变量对干巴菌分布的影响

根据坡度 (S) 划分 $45^\circ \leq S < 135^\circ$ 为半阳坡, $135^\circ \leq S < 225^\circ$ 为阳坡, $225^\circ \leq S < 315^\circ$ 为半阴坡。随着坡度增加, 干巴菌存在的概率增加, 50° 时其存在概率最大, 干巴菌主要生长于半阳坡和阳坡 (图 4a), 其主要原因是干巴菌属于菌根菌, 主要与云南松、马尾松、思茅松等植物共生, 而这类植物主要生长于光照强的阳坡。最冷季平均温



注: Al. 海拔; As. 坡向; Biol. 年平均温度; Bio11. 最冷季平均温度; Bio12. 年降水量; Bio14. 最干月降水量; Bio15. 降水季节性; Bio16. 最湿季降水量; Bio17. 最干季降水量; Bio3. 等温性; Cl. 黏土率; OM. 有机质; Sa. 沙土率; Si. 粉砂率; Sl. 坡度。

Note: Al. altitude; As. aspect; Biol. annual mean temperature; Bio11. mean temperature of coldest quarter; Bio12. annual precipitation; Bio14. precipitation of driest month; Bio15. precipitation seasonality (coefficient of variation); Bio16. precipitation of wettest quarter; Bio17. precipitation of driest quarter; Bio3. isothermality $[(\text{Bio2}/\text{Bio7})] \times 100$; Cl. clay rate; OM. organic matter; Sa. sand rate; Si. silt rate; Sl. slope.

图 3 基于刀切法的生态因子训练集增益分析结果

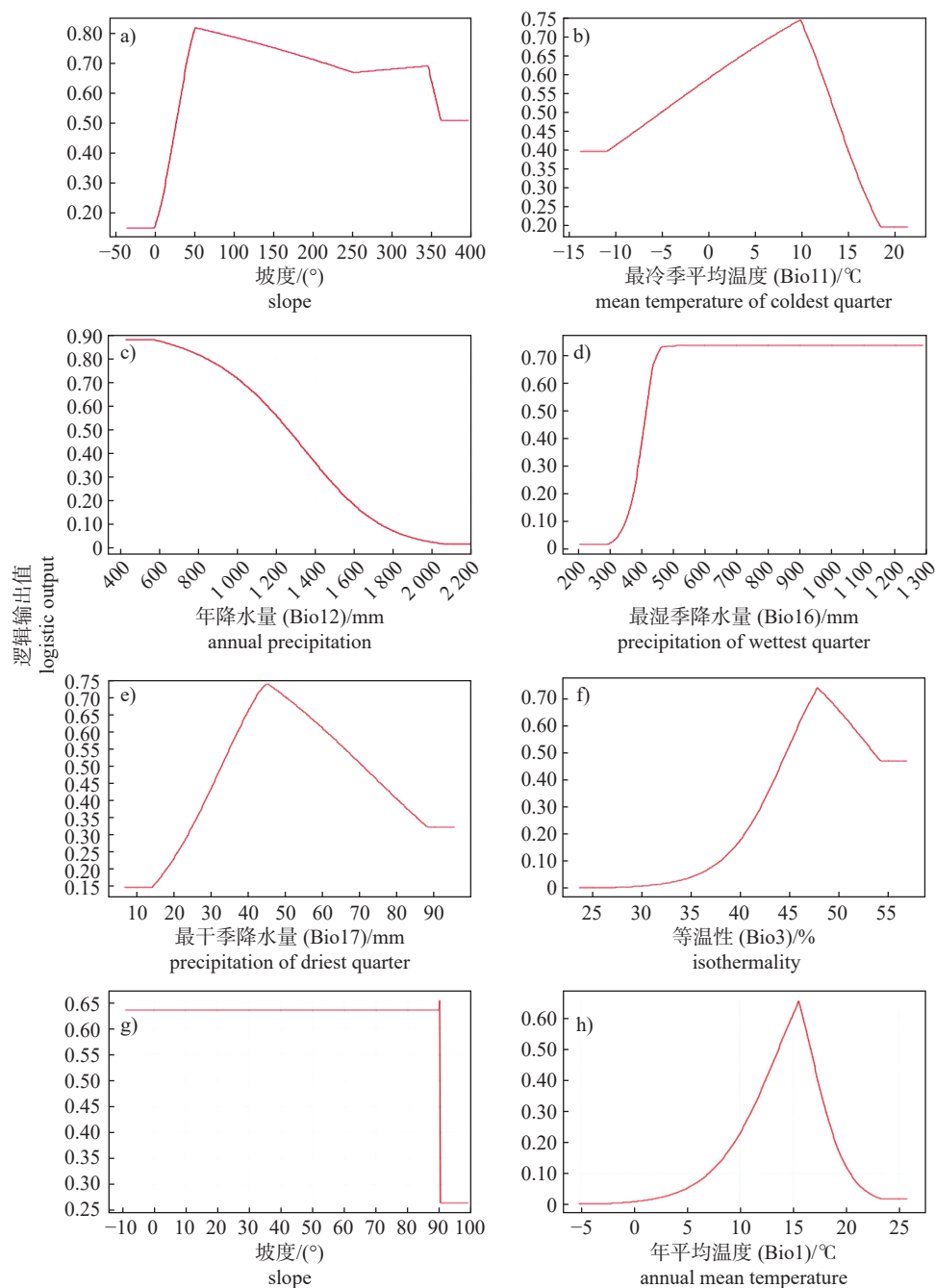
Fig. 3 Results of train set gain of ecological factors based on the Jackknife method

度 (Bio11) 低于 -5°C 不利于干巴菌生长; 当最冷季平均温度约为 10°C 时, 干巴菌的存在概率最大; 当最冷季平均温度大于 20°C 时, 干巴菌存在的概率最低 (图 4b)。年降水量 (Bio12) 为 400~1000 mm 时, 有利于干巴菌生存; 当年降水量大于 1000 mm 后, 干巴菌存在的概率随之降低 (图 4c)。最湿季降水量 (Bio16) 大于 450 mm 时, 干巴菌的存在概率最大, 该条件有利于干巴菌菌丝生长 (图 4d)。最干季降水量 (Bio17) 低于 20 mm 时不利于干巴菌的生存; 最干季节降水量在 40~60 mm 时, 对于干巴菌菌丝的生长较为有利 (图 4e)。等温性 (Bio3) 反映了干巴菌生长期内的热量水平, 当等温性为 44%~52% 时, 有利于干巴菌生长 (图 4f)。坡度对干巴菌分布的限制作用较弱 (图 4g)。年平均温度 (Bio1) 为 $13\sim 17^\circ\text{C}$ 时, 有利于干巴菌生存, 适宜干巴菌菌丝生长; 温度过低会抑制菌丝生长, 温度过高会使菌丝老化而失去活性, 不利于干巴菌生长 (图 4h)。

2.4 干巴菌适生区分布及其变化规律

2.4.1 当前适生区预测

由图 5 可知: 当前干巴菌高适生区面积为 $5.02 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占云南省总面积的 12.74%, 其地



注: a) 为坡向的反馈曲线, $45^{\circ} \leq \text{坡度} < 135^{\circ}$ 为半阳坡, $135^{\circ} \leq \text{坡度} < 225^{\circ}$ 为阳坡, $225^{\circ} \leq \text{坡度} < 315^{\circ}$ 为半阴坡。

Note: a) is the feedback curve of aspect, $45^{\circ} \leq \text{slope} < 135^{\circ}$ means half sunny slope, $135^{\circ} \leq \text{slope} < 225^{\circ}$ means sunny slope, and $225^{\circ} \leq \text{slope} < 315^{\circ}$ means shady slope.

图 4 各环境变量对干巴菌 MaxEnt 模型的反馈曲线

Fig. 4 Feedback curves of each environmental variable to the MaxEnt model of *T. ganbajun*

理范围主要涉及曲靖西部、昆明南部、楚雄南部、大理南部、保山东部、玉溪北部和红河北部, 临沧北部、普洱北部和文山西部也有零星分布; 中适生区面积为 $6.43 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占云南省总面积的 16.32%, 其地理范围主要涉及曲靖中部及南部、昆明北部、楚雄西北及东北部、丽江东部

和大理南部, 保山东部及东南部、临沧北部、普洱北部、红河北部和文山西北部也有零星分布; 低适生区面积为 $8.82 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占云南省总面积的 22.39%, 主要分布在曲靖北部、昭通南部、昆明北部、楚雄西北部、丽江南部及西南部、大理东北部及北部、怒江东部、保山西北部及西南

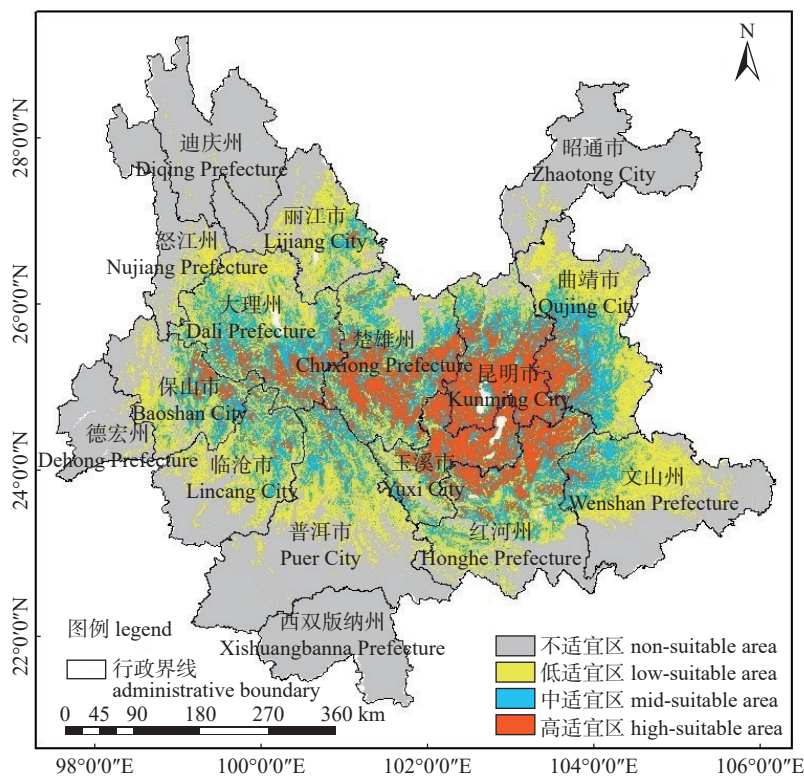


图 5 当前时期干巴菌的适生区分布

Fig. 5 Distribution of suitable habitat for *T. ganbajun* at present

部、临沧中部及北部、普洱东北及北部、红河南部及东北部、文山中部。

2.4.2 未来适生区分布

SSP126 气候情景下 (图 6), 21 世纪末 2100 年前后, 干巴菌高适生区面积为 $4.79 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占云南省总面积的 12.16%, 相比当前气候条件下, 高适生区面积将减少 0.14%, 其中曲靖西部、昆明大部、楚雄南部、大理南部、玉溪大部、保山东北部、普洱北部和红河北部的高适生区退缩最严重; 中适生区面积为 $5.97 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占云南省总面积的 15.15%, 相比当前将减少 1.17%, 其地理范围主要涉及曲靖中部及南部、昆明北部、楚雄西北及东北部、丽江东部和大理局部, 保山东部及东南部、临沧北部、普洱北部、红河北部、文山西北部和迪庆地区有零星分布; 低适生区面积为 $8.61 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占云南省总面积的 21.85%, 相比当前将减少 0.54%, 其地理范围涵盖了曲靖北部、昭通南部、昆明北部、楚雄西北部、丽江南部及东北部、大理东北部及北部、怒江东部、保山西北部及西南部、临沧中部、普洱东北及北部、红河南部及东北部、文山局部。

SSP370 情景下 (图 7), 至 2100 年, 干巴菌

高适宜区面积为 $4.49 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占云南省总面积的 11.39%, 相比当前气候条件下, 高适生区面积将减少 1.35%, 分布范围主要集中在滇中地区, 此外, 在滇西的保山和临沧以及滇西北的大理有零星分布; 中适生区面积为 $5.94 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占云南省总面积的 15.08%, 相比当前将减少 1.24%, 其主要分布在昭通、曲靖、昆明、楚雄、丽江、大理、保山、临沧、普洱、红河、文山等地; 低适宜区面积为 $8.51 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占云南省总面积的 21.60%, 相比当前将减少 0.79%, 其北界延伸至昭通地区, 南界位于红河—普洱一线, 西界在德宏境内, 东部边界位于曲靖—文山一线。随着气候变化加剧, 与当前相比, 未来非适生区面积将增加 3.38%。

2.5 适生区质心迁移与适生区范围变化

SSP126 情景下 (图 8), 2100 年前后, 质心将由当前位置 ($24^\circ 56' 56.4'' \text{N}$, $101^\circ 37' 37'' \text{E}$) 向南迁移至 $24^\circ 56' 5'' \text{N}$, $101^\circ 38' 24'' \text{E}$ 附近。稳定区面积为 $1.06 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占云南省总面积的 26.90%, 主要集中在曲靖南部、昆明、楚雄南部、大理南部及西部、保山东部、临沧东北部、普洱北部、玉溪北部及东北部、红河北部、文山西北部。收缩

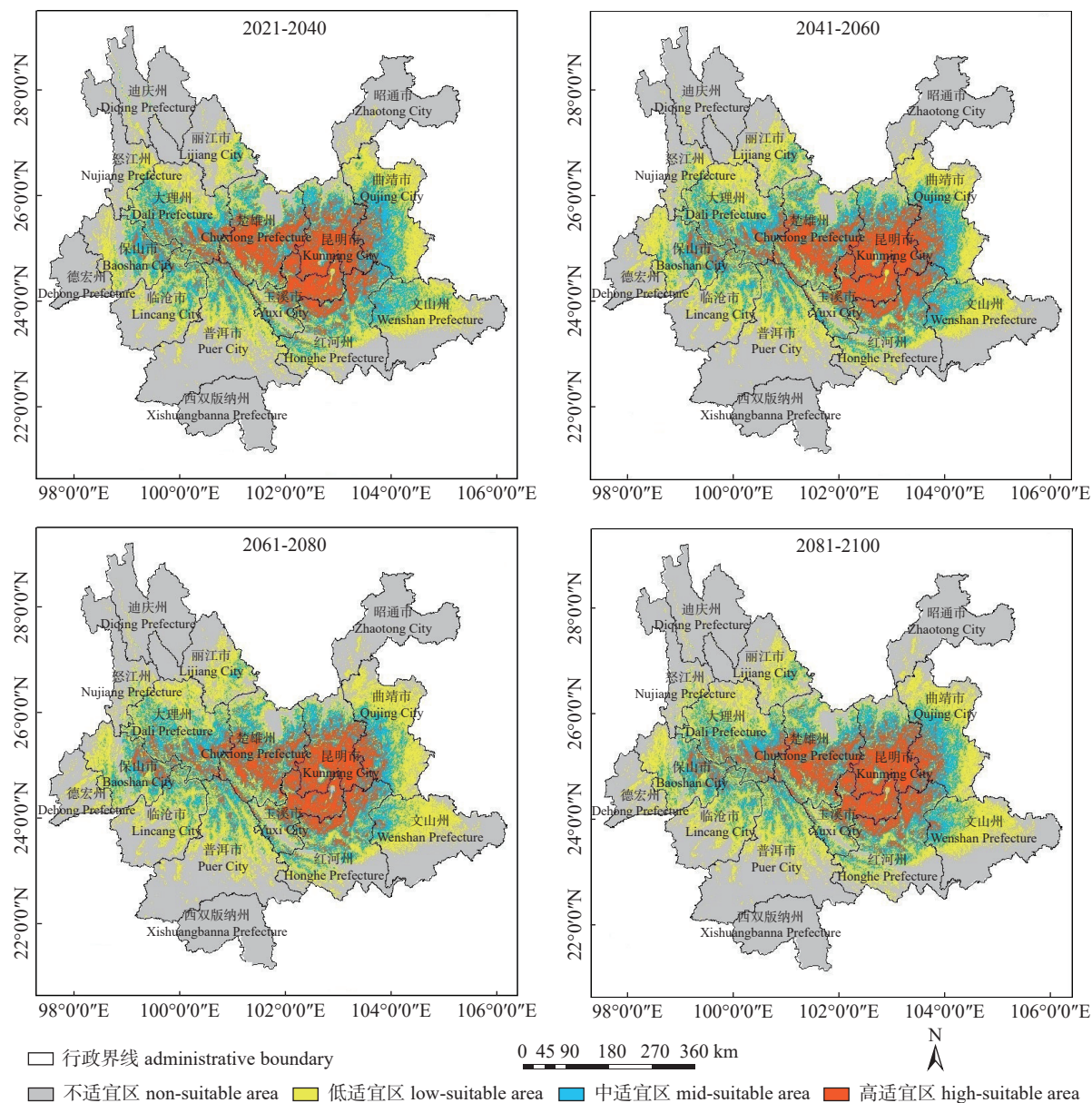


图 6 SSP126 情景下干巴菌的适生区分布

Fig. 6 Distribution of suitable habitat for *T. ganbajun* under SSP126 scenario

区面积为 $1.09\times10^4\text{ km}^2$, 占云南省总面积的 2.77%, 主要位于曲靖东南部、楚雄北部、丽江东部、大理东部、保山东南部、临沧东北部、普洱北部、红河东部、文山西部。扩张区面积为 $2.60\times10^3\text{ km}^2$, 占云南省总面积的 0.66%, 主要位于昆明北部、楚雄北部、保山西部、楚雄南部。

SSP370 情景下 (图 9), 至 2100 年, 质心将由当前的 $24^{\circ}56'56.4''\text{N}$, $101^{\circ}37'37''\text{E}$ 向南迁移至 $24^{\circ}56'59''\text{N}$, $101^{\circ}38'13''\text{E}$ 附近。稳定区面积为 $1.05\times10^5\text{ km}^2$, 占云南省总面积的 26.59%, 主要集中在曲靖南部、昆明、楚雄南部、大理南部及

西部、保山东部、临沧东北部、普洱北部、玉溪北部及东北部、红河北部、文山西北部。收缩区面积为 $1.21\times10^4\text{ km}^2$, 占云南省总面积的 3.07%, 主要位于曲靖东南部、楚雄北部、丽江东部、大理东部、保山西部及东南部、临沧北部、普洱北部、红河东部、文山西部。扩张区面积为 $5.20\times10^3\text{ km}^2$, 占云南省总面积的 1.31%, 主要在曲靖北部、昆明北部、楚雄北部、大理北部、迪庆南部、怒江南部、保山西部、临沧北部、普洱东北、红河西部及北部。

综合分析 2 种气候情景下物种分布变化的预

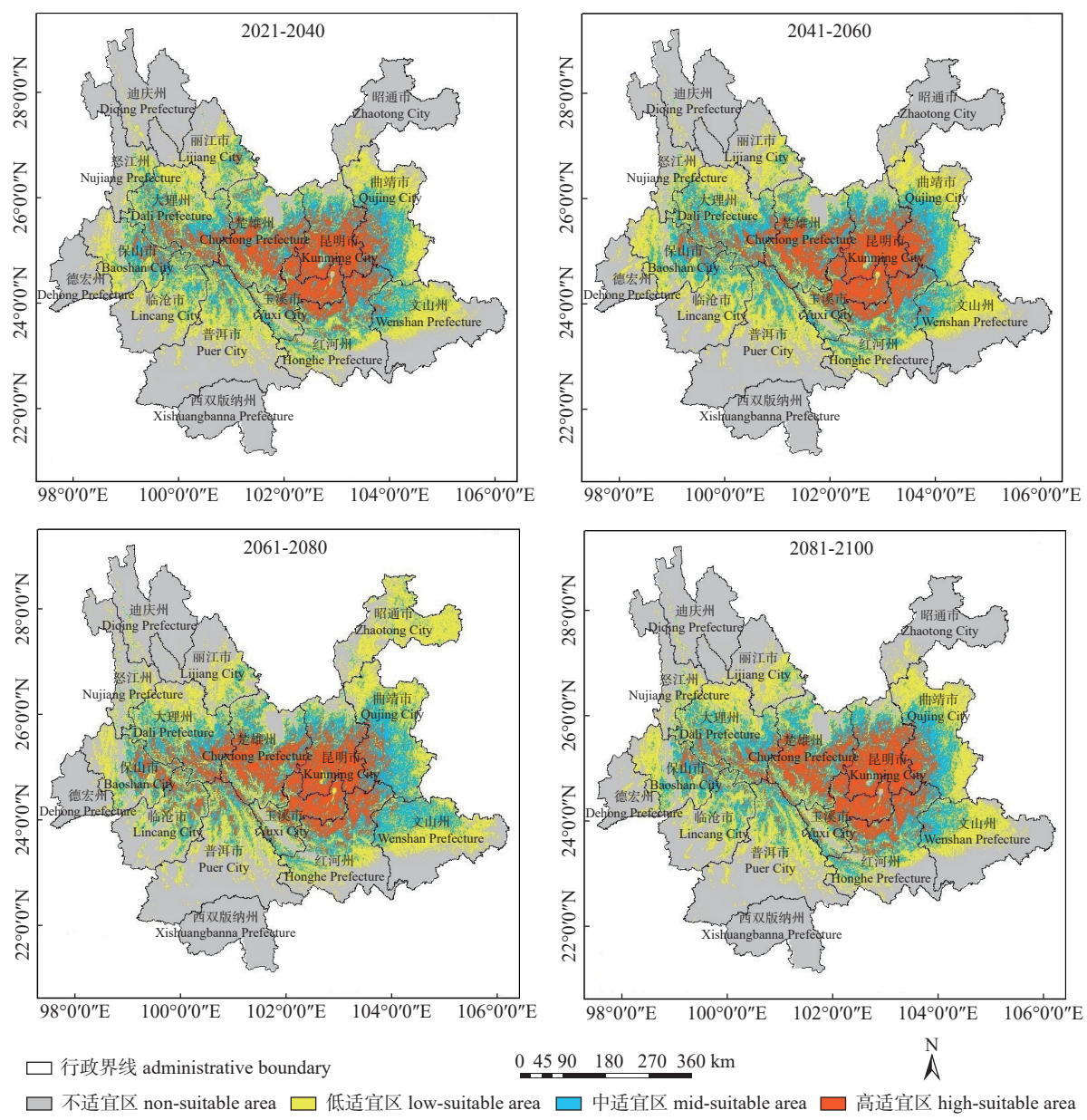


图 7 SSP370 情景下干巴菌适生区分布

Fig. 7 Distribution of suitable habitat for *T. ganbajun* under SSP370 scenario

测结果发现：未来昭通大部分地区、曲靖北部及东南部、昆明北部、楚雄北部、丽江北部及西部、迪庆大部、怒江大部、保山西部、德宏大部、临沧南部、普洱南部、西双版纳大部、红河南部、文山南部均不再适宜于干巴菌生长。

3 讨论

3.1 模型准确性

本研究基于 MaxEnt 模型，结合干巴菌分布点数据，以气候因子、地形因子和土壤因子作为研究区域的环境因子变量，对干巴菌适生区进行

预测。MaxEnt 模型训练集和测试集 AUC 值为 0.800~0.950，表明模型具有较好的预测效果。赵健等^[28]使用 MaxEnt 模型成功预测了烟粉虱 (*Bemisia tabaci*) 在中国的适生范围，其中全国高适生区面积占比为 5.6%，中适生区面积为 12.3%。塔旗等^[29]利用 MaxEnt 成功预测了中华穿山甲 (*Manis pentadactyla*) 在中国的适生区，其平均 AUC 值为 0.961，模型预测精度较高。周礼茂等^[30]使用 MaxEnt 模型预测了未来金银忍冬 (*Lonicera maackii*) 的适生区有向北方迁移而在西南方向收缩的趋势，且最佳适生区将严重丧失。郭立新

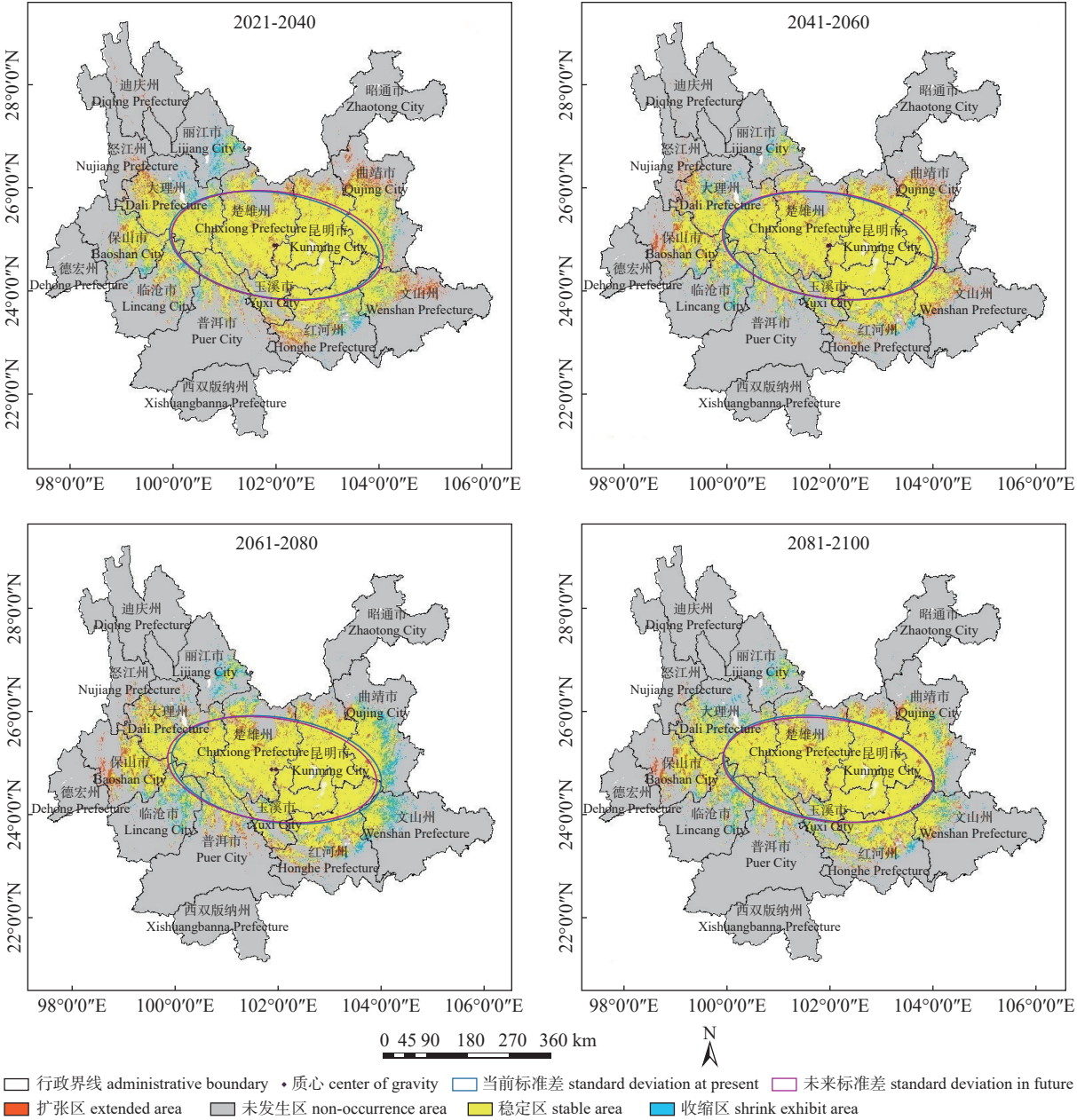


图 8 SSP126 情景下干巴菌适生区变化及质心迁移

Fig. 8 Suitable regions change and centroid migration of *T. ganbajun* under SSP126 scenario

等^[31]基于 MaxEnt 模型预测了大果青杆 (*Picea neoveitchii*) 在中国的潜在适生区及其分布变化, 模型 AUC 值为 0.937, 在未来 4 种排放路径下, 其潜在适生区将更加破碎零散, 适生区极具压缩, 物种呈现趋向灭亡的风险。以上研究均表明 MaxEnt 模型对预测物种的地理分布区和潜在适生区具有一定优势。

3.2 干巴菌分布的限制因子

干巴菌成熟时间为每年 6—10 月, 研究发现: 土壤理化性质及有效态微量元素会影响干巴

菌的分布^[32]。在干旱和降雨量偏少的情况下, 植被须根向地下生长, 导致缺少氧气, 不利于干巴菌子实体形成。本研究显示: 年降雨量 (Bio12) 为 600 mm、最湿季降水量 (Bio16) 大于 450 mm、最干季降水量 (Bio17) 在 40~60 mm 时, 较适宜于干巴菌菌丝生长。此外, 热量条件也会影响干巴菌分布。干巴菌子实体形成的适宜温度为 14~24 ℃, 担孢子萌发的适宜温度为 22~26 ℃, 温度过高也会导致菌丝死亡。本研究显示: 当等温性 (Bio3) 为 44%~52%、最冷季平均温度 (Bio11) 约

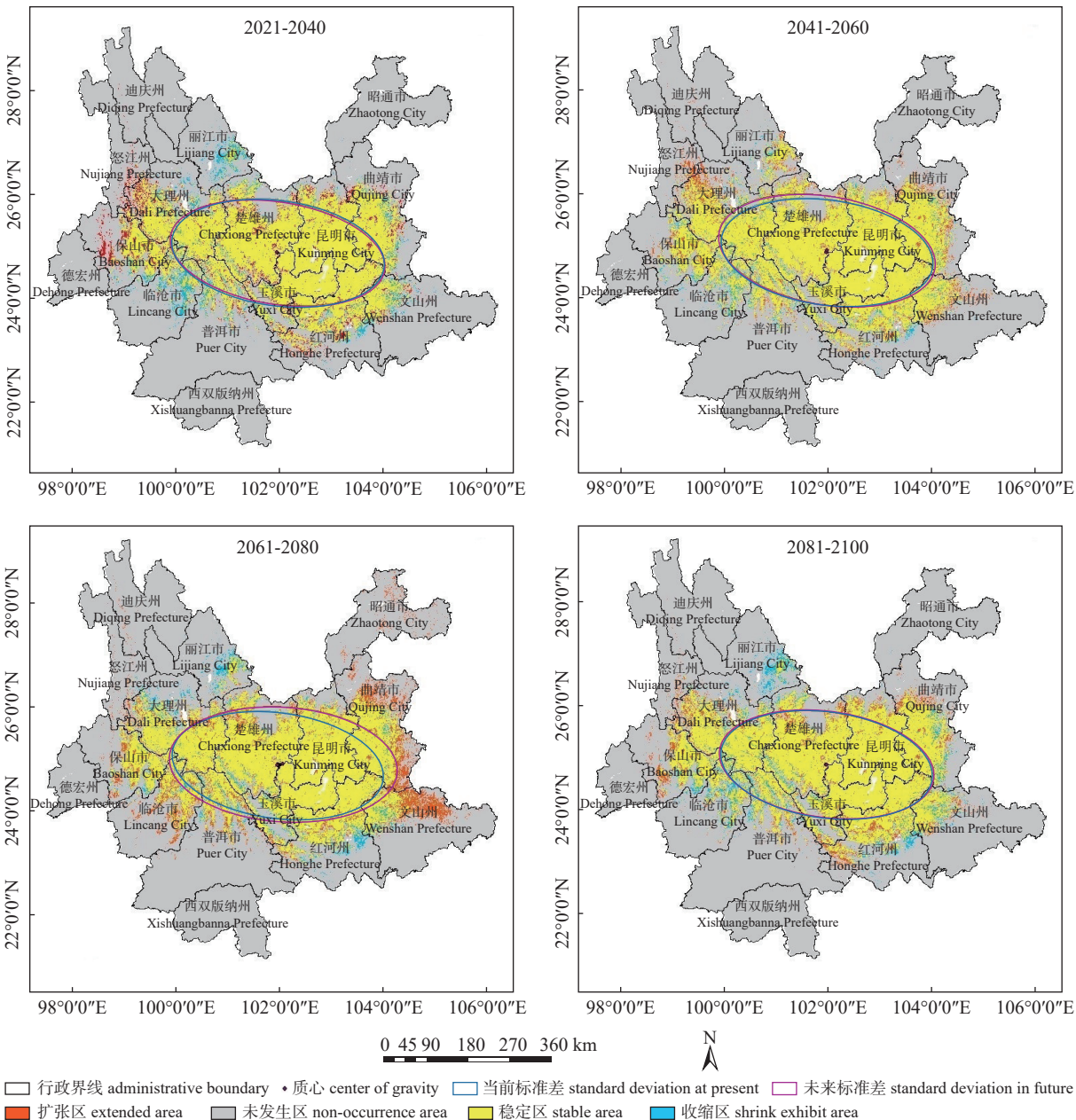


图 9 SSP370 情景下干巴菌适生区变化及质心迁移

Fig. 9 Suitable regions change and centroid migration of *T. ganbajun* under SSP370 scenario

为 10 ℃ 时，干巴菌存在的概率最大。此外，半阳坡和阳坡也有利于干巴菌的生长。

3.3 干巴菌的空间分布特征

王庆莉等^[33]基于 MaxEnt 模型成功预测了川西高原松茸 (*Tricholoma matsutake*) 的生态适宜性分布。王森源等^[22]基于 MaxEnt 模型对蒙古白丽蘑菇适生区进行预测，研究表明：最暖季度降水量、最冷季度降水量和温度季节性变化是影响其分布的主导因子，在未来气候情景下，蒙古白丽蘑菇最佳适生区和高适生区将向高纬度转移。本

研究模型预测显示：干巴菌的适生区主要集中分布于滇中地区，主产区集中在昆明、玉溪、楚雄等地，适生区质心位于楚雄境内，这一结论与前人对云南食用菌分布的研究结果^[34]相符。未来随着全球气候变化的加剧，干巴菌适生区面积将出现一定程度的变化。气候变化导致云南省干巴菌适宜生境收缩面积远大于扩张面积，并呈现出滇中地区收缩、滇中北部地区扩张的变化趋势。因此，未来气候变化不利于干巴菌生产，应建立相关措施以维护干巴菌的生长和生产。

3.4 干巴菌保护的建议

块菌、红汁乳菇 (*Lactarius lividatus*) 等食用菌已实现人工合成菌根并解决了人工栽培的难题^[35-36]。然而,干巴菌子实体中含有多种杂菌,其分离菌种难度大且脱离宿主植物后其菌丝不能独立存活,因此,难以利用人工合成菌根的方式实现干巴菌的人工栽培。

目前,干巴菌的培育仍以人工促繁为主。人工促繁主要是对干巴菌生长分布的林地实施封山育菌,改变植被郁闭度,形成适宜干巴菌生长的自然生境。基于本研究结果,为应对未来气候变化,提出以下建议:(1)根据野生干巴菌的分布状况和生态环境特点合理规划干巴菌中高产区;(2)将森林资源保护与减少人为活动干扰措施相结合,防止干巴菌生境遭受人为破坏与持续恶化;(3)制定合理的林地保护措施、监测林下环境变化,采取人工灌溉的方式为林地适当补水,避免林下生境过于干燥而影响干巴菌生长;(4)对伴生林木进行及时修剪树枝,并为干巴菌搭建遮阴保护等,防止通风不畅、光线直射等因素造成其子实体的高温伤害;(5)定期调查干巴菌的种群数量和分布情况,规范采摘行为。上述保护策略的实施有助于促进干巴菌生境的生态修复,为实现干巴菌资源的可持续利用提供理论和方法依据。

4 结论

本研究基于MaxEnt模型,结合ArcGIS 10.2软件分析,以干巴菌坐标点、气候因子、地形因子为环境变量,预测未来气候变化对云南干巴菌地理分布的影响,使用刀切法确定Bio1(年平均温度)、Bio3(等温性)、Bio11(最冷季平均温度)、Bio12(年降水量)、坡度、Bio16(最湿季降水量)、坡向和Bio17(最干季降水量)是影响云南省干巴菌分布的关键生态因子。未来气候变化将导致云南境内干巴菌适生区面积减少,且收缩面积大于扩张面积,其中滇中地区受气候变化的影响最为严重。

[参考文献]

[1] 魏杰,杨岳,李树红,等.干巴菌物种复合群与云南松形成的外生菌根形态特征及分子鉴定[J].中国食用菌,2018,37(1):14. DOI: 10.13629/j.cnki.53-1054.2018.01.

004.

[2] CHEN L P, ZHU H, LI Y F, et al. Combining multielement analysis and chemometrics to trace the geographical origin of *Thelephora ganbajun*[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 96(1): 103699. DOI: 10.1016/j.jfca.2020.103699.

[3] 王冉,于富强.云南干巴菌子实体内可培养微生物[J].微生物学通报,2018,45(5):1112. DOI: 10.13344/j.micriobiol.china.170529.

[4] YANG W M, LIU J K, HU L, et al. Antioxidant properties of natural *p*-terphenyl derivatives from the mushroom *Thelephora ganbajun*[J]. Zeitschrift für Naturforschung C, 2004, 59(5): 360. DOI: 10.1515/znc-2004-5-612.

[5] YANG F, ZHAO M J, ZHOU L, et al. Identification and differentiation of wide edible mushrooms based on lipidomics profiling combined with principal component analysis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(34): 9991. DOI: 10.1021/acs.jafc.1c02269.

[6] 臧穆.东喜马拉雅引人注目的高等真菌和新种[J].云南植物研究,1987,9(1):84.

[7] 张光飞,余婷,杨小雨,等.基质对干巴菌侵染云南松幼苗形成菌根的影响[J].中国食用菌,2017,36(6):24. DOI: 10.13629/j.cnki.53-1054.2017.06.005.

[8] EKAH B J, AKWAGIOBE J U, UDO S O, et al. A review on Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 1st to 6th report[J]. Physical Science International Journal, 2023, 27(1): 17. DOI: 10.9734/psij/2023/v27i1775.

[9] 庞荣荣,刘鸣谦,高露双,等.基于物种分布模型的兴安落叶松林概率分布区动态研究[J].西北林学院学报,2023,38(6):2. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2023.06.01.

[10] 张军,石若利,张雪,等.基于随机森林模型的国家重点保护药用植物物种优先保护区的识别[J].西南大学学报(自然科学版),2022,44(8):69. DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.08.008.

[11] 王学志,徐卫华,欧阳志云,等.生态位因子分析在大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)生境评价中的应用[J].生态学报,2008,28(2):822. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2008.02.045.

[12] ZHANG K L, SUN L R, TAO J. Impact of climate change on the distribution of *Euscaphis japonica* (Staphyleaceae) trees[J]. Forests, 2020, 11(5): 525. DOI: 10.3390/f11050525.

[13] 朱源,康慕谊.排序和广义线性模型与广义可加模型在植物种与环境关系研究中的应用[J].生态学杂志,2005,24(7):808. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2005.0045.

[14] 吕环鑫,夏少霞,顾婧婧,等.基于MaxEnt模型的仙居县大型兽类和珍稀鸟类栖息地适宜性评价[J].生态学杂志,2023,42(11):2798. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202311.011.

[15] 王俊伟,陈永豪,许敏,等.气候变化背景下入侵植物曼陀罗在西藏的潜在风险区预测[J].生态学报,2023,43(20):8622. DOI: 10.20103/j.stxb.202212293697.

[16] MESHGI B, MAJIDI-RAD M, HANAFI-BOJD A A, et al. Ecological niche modeling for predicting the habitat

- suitability of fascioliasis based on maximum entropy model in southern Caspian Sea littoral, Iran[J]. *Acta Tropica*, 2019, 198: 105079. DOI: [10.1016/j.actatropica.2019.105079](https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2019.105079).
- [17] 李尤, 唐雪海, 王雷宏, 等. 基于MaxEnt模型的不同气候情景下白蜡树中国适生区预测[J]. *西北林学院学报*, 2021, 36(6): 104. DOI: [10.3969/j.issn.1001-7461.2021.06.14](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-7461.2021.06.14).
- [18] SHRESTHA U B, BAWA K S. Impact of climate change on potential distribution of Chinese caterpillar fungus (*Ophiocordyceps sinensis*) in Nepal Himalaya[J]. *PLoS One*, 2014, 9(9): e106405. DOI: [10.1371/journal.pone.0106405](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106405).
- [19] 曹槟, 林汝楷, 刘冬梅, 等. 野生食用菌“茸菇”的物种多样性及中华美味蘑菇适生区预测[J]. *菌物学报*, 2022, 41(2): 192. DOI: [10.13346/j.mycosystema.210233](https://doi.org/10.13346/j.mycosystema.210233).
- [20] CAO Y T, LU Z P, GAO X Y, et al. Maximum entropy modeling the distribution area of *Morchella dill.* Ex Pers. species in China under changing climate[J]. *Biology*, 2022, 11(7): 1027. DOI: [10.3390/biology11071027](https://doi.org/10.3390/biology11071027).
- [21] CHEN J H, SHEN S, ZHOU L W. Modeling current geographic distribution and future range shifts of *Sanghuangporus* under multiple climate change scenarios in China[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 1064451. DOI: [10.3389/fmicb.2022.1064451](https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1064451).
- [22] 王森源, 宝秋利, 包玉英, 等. 基于MaxEnt模型的蒙古白丽蘑适生区预测[J]. *菌物学报*, 2023, 42(10): 2147. DOI: [10.13346/j.mycosystema.220513](https://doi.org/10.13346/j.mycosystema.220513).
- [23] 肖丽琼, 周汝良, 龙晓敏, 等. 云南省地形隆起高度与切割深度分析[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 40(2): 152. DOI: [10.11721/cqnuj20220613](https://doi.org/10.11721/cqnuj20220613).
- [24] 朱华. 云南种子植物区系地理成分分布格局及其意义[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(8): 831. DOI: [10.3321/j.issn:1001-8166.2008.08.006](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-8166.2008.08.006).
- [25] 李才慧, 徐爽. 生物多样性保护背景下云南省野生食用菌产业可持续发展探讨[J]. *广西植物*, 2023, 43(8): 1448. DOI: [10.11931/guihaia.gxzw202302006](https://doi.org/10.11931/guihaia.gxzw202302006).
- [26] 严胜泽, 罗情情, 叶开温, 等. 野生干巴菌(*Thelephora ganbajun* M. Zang)在中国的新分布[J]. *亚热带植物科学*, 2021, 50(4): 314. DOI: [10.3969/j.issn.1009-7791.2021.04.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-7791.2021.04.011).
- [27] 黄秋晨, 梁香娜, 张颖. 外生菌根菌: 干巴菌的研究进展[J]. *中国食用菌*, 2022, 41(10): 15. DOI: [10.13629/j.cnki.53-1054.2022.10.002](https://doi.org/10.13629/j.cnki.53-1054.2022.10.002).
- [28] 赵健, 李志鹏, 张华纬, 等. 基于MaxEnt模型和GIS技术的烟粉虱适生区预测[J]. *植物保护学报*, 2019, 46(6): 1295. DOI: [10.13802/j.cnki.zwbhxb.2019.2019166](https://doi.org/10.13802/j.cnki.zwbhxb.2019.2019166).
- [29] 塔旗, 李言阔, 范文青, 等. 基于最大熵生态位模型的中华穿山甲潜在适宜生境预测[J]. *生态学报*, 2021, 41(24): 9949. DOI: [10.5846/stxb202009152403](https://doi.org/10.5846/stxb202009152403).
- [30] 周礼茂, 吴海洋, 田斌. 基于MaxEnt优化模型对不同时期金银忍冬潜在适生区动态模拟分析[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2024, 44(3): 43. DOI: [10.11929/j.swfu.202305048](https://doi.org/10.11929/j.swfu.202305048).
- [31] 郭立新, 张春回, 宫盱彤, 等. 基于MaxEnt模型的大果青杆潜在适生区及其分布变化[J]. *西部林业科学*, 2024, 53(3): 39. DOI: [10.16473/j.cnki.xblykx1972.2024.03.005](https://doi.org/10.16473/j.cnki.xblykx1972.2024.03.005).
- [32] 张珊珊, 毛云玲, 冯志伟, 等. 云南松林下干巴菌生长土壤的理化性质及有效态微量元素特征[J]. *西部林业科学*, 2020, 49(6): 41. DOI: [10.16473/j.cnki.xblykx1972.2020.06.006](https://doi.org/10.16473/j.cnki.xblykx1972.2020.06.006).
- [33] 王庆莉, 王茹琳, 张利平, 等. 基于MaxEnt模型的川西高原松茸气候生态适宜性与潜在分布[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(7): 2529. DOI: [10.13287/j.1001-9332.2021.07.013](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.2021.07.013).
- [34] 杨祝良, 吴刚, 李艳春. 中国西南地区常见食用菌和毒菌[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [35] 王溢洋, 张国庆, 秦岭, 等. 块菌人工栽培现状及菌根苗培育方法的研究进展[J]. *微生物学通报*, 2023, 50(3): 1247. DOI: [10.13344/j.microbiol.china.220804](https://doi.org/10.13344/j.microbiol.china.220804).
- [36] 祁金玉, 邓继峰, 尹大川, 等. 外生菌根菌对油松幼苗抗氧化酶活性及根系构型的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(8): 2830. DOI: [10.5846/stxb201805091027](https://doi.org/10.5846/stxb201805091027).

责任编辑: 何馨成