



“青藏高原农田生态系统与粮食安全”专题(二)

Special issue II on “Scientific Expedition and Research on Farmland Ecosystem and Food Security in Qinghai-Xizang Plateau”

CSTR: 32241.14.CJAE Biology.2024.12032

DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2024.12032

潘开文, 王学经, 唐亚伟, 沈裕虎, 张林, 潘志芬. 青藏高原农田生态系统与粮食安全科学考察研究专题进展(二) [J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30 (6): 1055-1063

Pan KW, Wang XJ, Tang YW, Shen YH, Zhang L, Pan ZF. Progress of the scientific expedition and research on farmland ecosystem and food security in Qinghai-Xizang Plateau (II) [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, 30 (6): 1055-1063

青藏高原农田生态系统与粮食安全 科学考察研究专题进展(二)

潘开文¹✉ ^{iD} 王学经¹ 唐亚伟² 沈裕虎³ 张林¹ 潘志芬¹

¹中国科学院成都生物研究所, 生态恢复与生物多样性保育四川省重点实验室 成都 610213

²西藏自治区农牧科学院农业研究所 拉萨 850032

³中国科学院西北高原生物研究所 西宁 810008

摘要 青藏高原是世界上海拔最高的高原, 具有重要的生态、战略和发展意义, 但其农业发展面临低温、干旱和土壤退化等挑战。本文阐述了第二次青藏高原综合科学考察研究任务三生态系统与生态安全专题三“农田生态系统与粮食安全”的科学考察背景、思路、研究目标以及取得的新的阶段性进展, 旨在揭示农田生态系统结构与功能的时空变化及驱动机制, 提出优化管理方案以保障粮食安全和可持续发展。本期专题论文研究聚焦农田土壤管理、气候变化、农业生产潜力、作物培育、碳平衡、作物品质与利用等方面, 结合遥感、建模等技术, 提出应对气候变化和农业资源利用的策略, 为区域农业绿色可持续发展提供科学依据和政策支持。未来研究将进一步关注气候变化影响及农业发展与生态保护的协同机制, 推动“农-林-牧”复合生态系统建设和农旅融合高质量发展, 以实现粮食生产、生态保护和经济建设的多重目标。(参70)

关键词 青藏高原; 农田生态系统; 粮食安全; 生态功能; 气候变化; 生产潜力

Progress of the scientific expedition and research on farmland ecosystem and food security in Qinghai-Xizang Plateau (II)

PAN Kaiwen¹✉ ^{iD}, WANG Xuejing¹, TANG Yawei², SHEN Yuhu³, ZHANG Lin¹ & PAN Zhifen¹

¹Ecological Restoration Biodiversity Conservation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610213, China

²Institute of Agriculture, Xizang Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850032, China

³Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China

Abstract The Qinghai-Xizang Plateau is the highest plateau in the world, holding critical ecological, strategic, and developmental importance. However, agricultural development in this region encounters substantial challenges, including low temperatures, drought, and soil degradation. This article outlines the background, conceptual framework, research objectives, and advancements in the third task of the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program, focusing on “Farmland Ecosystems and Food Security.” This study aimed to investigate the spatiotemporal dynamics and driving mechanisms of farmland ecosystems and develop optimized management strategies to ensure food security and sustainable development. This special issue addresses crucial aspects such as farmland soil management, climate change adaptation, agricultural productivity, crop breeding, carbon balance, and crop quality and utilization. Strategies have been proposed to address climate change and optimize the use of agricultural resources by integrating remote sensing, modeling, and other

收稿日期 Received: 2024-12-20 接受日期 Accepted: 2024-12-25

第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0303)资助 Supported by the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (2019QZKK0303)

✉通信作者 Corresponding author (E-mail: pankw@cib.ac.cn; iD: <https://orcid.org/0000-0003-1770-8219>)

advanced methodologies. These initiatives seek to provide robust scientific evidence and policy recommendations to facilitate green and sustainable agricultural development in the region. Future research should further explore the impact of climate change and promote the integration of agricultural and ecological systems. It aims to develop a diversified “agriculture-forestry-animal husbandry” composite ecosystem, striving to achieve the interconnected objectives of food production, ecological conservation, and economic development.

Keywords Qinghai-Xizang Plateau; farmland ecosystem; food security; ecological function; climate change; productive potential

青藏高原地处亚洲大陆腹地,地理范围介于北纬26°00′-39°47′、东经73°19′-104°47′之间,是中国面积最大、全球海拔最高的高原,其总面积达到2 572 400 km²,约占中国陆地总面积的26.8%,常年居住人口1 450万^[1-2]。青藏高原享有“世界屋脊”、“亚洲水塔”和“地球第三极”的美誉,不仅是我国重要的生态安全屏障,也是我国重要的资源储备基地,具有无可替代的战略、生态和发展价值。青藏高原耕地面积不足1.2%^[3],人均耕地面积小,农业生产主要依赖于青稞、小麦、油菜等作物。因受独特的地理和气候条件的影响,区域农业可持续发展面临诸多挑战,如低温、冻害、干旱、水土流失和土地沙化等问题。同时由于不合理的农业活动,局部区域耕地肥力下降,农业生态环境问题逐渐显现,保障区域粮食安全是促进青藏高原地区可持续发展的关键。因此,开展青藏高原农田生态系统和粮食安全的科学考察研究具有重要的现实与战略意义,可为解决该地区农业可持续发展问题以及维持区域生态安全提供决策依据。

1 农田生态系统与粮食安全科考背景

1.1 科考问题

为深入了解和应对区域农业生态环境演变及可持续发展问题,第二次青藏高原综合科学考察研究设立了“青藏高原农田生态系统与粮食安全”专题。该专题旨在深入分析农田生态系统结构和功能的时空演变规律,揭示其驱动机制,以期为保障区域粮食安全,促进区域乡村振兴提供科学决策依据。该专题属“生态系统与生态安全”任务三的组成部分,主要聚焦以下科学问题:(1)区域尺度农田生态系统典型参数的空间非平衡性;(2)区域农田植被多样性空间格局及其驱动机制;(3)区域农田肥力及土壤动物多样性空间格局及其驱动机制;(4)区域生产经营方式对农田生态系统结构和功能的影响机制;(5)构建维持区域农田生态系统粮食安全的优化管理方案。

农田生态系统(agroecosystem)是以作物为中心,以农田气候、土壤环境为基底,由动物、植物和微生物等构成的生态系统。目前相关部门和科研机构已在青藏高原地区开展了大量的调查与研究,研究内容涵盖农业普查、耕地质量调查、土壤污染普查等多个领域,包括农作物种质资源的收集与利用、农田有害生物调查、土壤污染状况评估、作物种植与质量评价等。然而,尽管前期积累了大量的数据,但在区域尺度上,仍存在以下几个主要问题:(1)青藏高原农田生态系统分类体系尚不统一,缺乏适应本地区特殊地理环境的分类标准;(2)青藏高原作物品质的区域尺度研究不足,作物的品质、种植品种和环境因素的关联性研究相对匮乏;(3)土壤肥力和土壤生物功能的研究尚处于初步的阶段,特别是土壤生物多样性及其功能的研究较为有限;(4)缺乏系统、深入的农田生态系统调

查,无法全面揭示农田生态系统的结构与功能变化及其驱动机制;(5)现有研究大多集中于单一生态因子,而缺乏对气候、土壤、植物、生产经营管理等多个因子的整合分析研究^[4]。

1.2 科考思路

围绕青藏高原主要农业区,采用遥感技术、无人机图像分析和数学建模等多种手段与方法,探究农田生产与经营管理、农田植被结构、土壤肥力及土壤生物功能、作物产量和品质等的时空分布特征及其驱动机制,具体如下。(1)农田生产与经营管理:全面掌握农田生产要素的时空分布特征,揭示其演变规律,提出维持生态系统可持续性的农田管理优化方案。(2)农田植被:调查植被群落类型、物种组成、杂草多样性等,提出植物群落优化调控和种植结构调整方案。(3)土壤肥力与生物功能:研究土壤养分及土壤生物的空间分布和功能类群,提出土壤肥力和生物多样性保护方案。(4)作物产量与品质:调查作物产量、品质、农残等,分析其空间分布特征,提出提升作物产量和品质的解决方案。(5)农业气象灾害:研究农业气候资源、灾害天气的时空变化特征及其对农业发展的影响,以及农田可持续适应性管理技术。(6)综合评估与制图:建立农田生态系统分类体系,分析影响农田生态系统结构和功能的关键因子,为制定预警方案和解决区域粮食安全问题提供依据。

1.3 科考目标

通过全面调查与研究,揭示青藏高原农田生态系统结构和功能的时空变化规律,阐明其驱动机制,提出维持农田生态系统可持续性和保障粮食安全的系统解决方案,建立青藏高原农田生态系统和粮食安全科学考察数据库,为该区域农业生态安全、乡村振兴和可持续发展提供数据支撑与决策依据。

2 科学考察研究主要进展

考察研究任务由中国科学院成都生物研究所、西藏自治区农牧科学院、中国科学院西北高原生物研究所、中国科学院西北生态环境资源研究院、甘肃省农业科学院、青海省农林科学院、四川农业大学、农业农村部沼气科学研究所、四川师范大学、宜宾学院和四川省气象台等单位承担。自任务启动以来,科考队调查了超过8 000个植物样方,收集植物、土壤、土壤微生物等样品超过9 000份,记录典型农业生产系统影像超过2 TB,绘制图鉴超过200幅;发表130篇论文,其中SCI论文55篇;出版专著2部,获得17项授权专利,完成12项标准/规程(已发布),提交10项咨询建议,获得多项省部级奖励。考察研究工作在青藏高原农田植被、农田杂草和病虫害、土壤肥力和土壤动物、农业气象灾害、土壤微塑料^[5]等分布特征、作物产量和品质及利用、生产要素和经营管理等方面取得重要进展。

2022年,科考团队在《应用与环境生物学报》组织出版了专题1期,收录23篇文章,集中展示了青藏高原农田科考专

题阶段研究成果. 研究内容涉及农业气候资源、农田植被、作物病虫害、土壤肥力与生物功能类群、作物产量品质、入侵物种、耕地变化等^[4]. 针对青藏高原降水、热量资源、湿润状况、风速、日照等农业气候因素展开探讨^[6-10], 揭示了其时空分布特征及其对农事活动、作物种植、产量和品质的影响^[6-10]. 探索了农田植被杂草种群的生态位及其扩张预测, 提出了防治技术策略^[11-12]. 病虫害研究方面, 填补了青藏高原地区有害生物生态学特征与入侵风险的空白, 为作物部分病虫害防控提供了基础数据^[13-14]. 土壤肥力及土壤生物功能类群研究分析了土壤改良、养分循环及土壤微生物与氮磷等营养物质的关系, 为农田土壤健康管理提供了科学依据^[15-17]. 同时, 报道了青藏高原地区作物品种筛选、基因功能研究以及作物高效种植与加工技术^[18-24]. 此外, 还报道了青藏高原地区粮食增产成因、耕地变化及种植结构调整等相关考察研究成果^[3, 24-26].

本期专题收录25篇科考专题论文, 内容聚焦6个方面: 气候变化及其对农业生态系统的影响, 农业废弃物资源化利用与土壤管理, 农业生产潜力及作物生长, 作物品质和加工利用, 种质资源及病原菌群, 农业温室气体减排和碳平衡等. 分别总结如下.

2.1 气候变化及其对农业生态系统的影响

本期专题收录4篇涉及青藏高原气候变化及其对农业生态系统影响的论文, 重点关注极端气象事件(如高温、干旱、雨涝等)给农业生态系统带来的挑战, 为探究青藏高原地区农业如何应对气候变化提供理论基础.

全球变暖背景下青藏高原雨涝灾害有逐渐增多的趋势. 王春学等人通过剖析近40年青藏高原雨涝时空变化的规律特征, 构建了新的雨涝指数^[27]. 青藏高原主要以轻到中度雨涝为主, 大部分地区年雨涝日数在20 d以上, 但空间差异大, 可以将其分为河湟谷地、川西北、雅鲁藏布江流域、横断山脉南部、羌塘高原—柴达木盆地和三江源区等6个区域. 从年际变化趋势看, 雅鲁藏布江流域和横断山脉南部的雨涝日数没有明显的变化趋势, 河湟谷地和羌塘高原—柴达木盆地1980年代开始出现增多趋势, 川西北和三江源21世纪00年代起出现增多趋势. 从周期变化来看, 各区域的年际和年代际周期各不相同. 有必要分区域研究并制定应对雨涝灾害策略, 避免农田生态系统和农事活动遭受更大的损失.

魏娜巍等人利用青藏高原地区1961-2020年的气象观测数据分析, 发现平均累积积雪深度和积雪日数为72 cm和17.6 d; 平均积雪初日、终日、积雪期分别为11月21日、3月29日和292 d, 积雪初日在高原东部出现最早, 向西部、南部延伸时逐渐变晚^[28]. 积雪的年内分布主要集中在10月至次年4月, 积雪日数和累积积雪深度呈单峰型分布; 冬季积雪日数和累积积雪深度主要受降水的影响, 而春、秋季主要受气温的影响. 随海拔和纬度的升高, 积雪日数和累积积雪深度均显著增加, 且积雪期延长. 70%地区的累积积雪深度和积雪日数呈减少的趋势, 且积雪初日大部分推迟、终日提前, 积雪期显著缩短.

探究青藏高原地区高温日数、高温热浪和干旱事件的时空变化特征, 对提升农业防灾避灾能力、优化农业种植结构和区域农业产业布局具有积极意义. 赵金鹏等人研究发现, 青藏高原西北和东南边陲区域热浪发生等级和频次较高, 藏北高原对全球气温升高更为敏感^[29]. 近50年共发生4 010次高温热浪, 轻、中和重度分别占56.36%、26.58%和17.06%. 大部分高温发生的初日显著提前, 终日显著推迟, 受高温影响的总时间变长^[29]. 青藏高原作物生长季(4-10月)干旱强度最强出

现在5月, 西藏南部、柴达木盆地和横断山脉南部部分地区干旱频率达80%以上; 其次为4月和6月, 7月之后整体干旱强度逐月递减, 7月仅帕米尔高原—昆仑山脉以北仍有较高的干旱频率^[30]. 年尺度干旱强度表现在横断山脉南部—念青唐古拉山东部、松潘高原北部、西藏中南部零星地区显著增强, 帕米尔高原—昆仑山脉西部、柴达木盆地—横断山脉西北部呈减弱趋势, 念青唐古拉山东部—横断山脉南部、西藏中南部均在2009年存在干旱显著增强的突变点^[30].

随着全球气候变暖, 青藏高原大部分地区的高温热浪、干旱事件的发生频率和强度将会明显增强, 积雪累积时间和深度呈下降趋势, 可能导致灌溉水源减少, 从而影响作物生长和产量. 由于青藏高原复杂的地理和气候环境, 洪涝威胁呈明显的区域性差异, 不同区域的农业生态系统受到的潜在影响大小不同. 因此需高度关注高温、干旱和洪涝风险的时空变化, 提升区域性气象灾害监测和农业抗灾减灾能力.

2.2 农业废弃物资源化利用与土壤管理

以提升农业生产的可持续性和减少环境污染为目标, 本期专题收录4篇研究论文, 涉及土壤改良、作物秸秆利用和氮素管理等.

土壤盐渍化是全球范围内威胁干旱和半干旱地区农业生产、粮食安全和可持续发展面临的最重要的环境问题之一^[31]. 柴达木盆地位于青藏高原东北部, 属封闭性山间断陷盆地, 其土壤盐化程度较高. 王鸿霞等人研究表明, 柴达木盆地土粒级以粉粒(64%-84%)和砂粒(14%-35%)为主, 粉土和粉壤土占比较高^[32]. 随盐化程度增加, 土壤颗粒和质地变细, 有机碳含量下降; 不同盐化土壤平均分形维数 D 的变化范围为2.38-2.55, 可蚀性因子 K 值范围为0.050-0.059, 总体侵蚀风险较高; 土壤可蚀性主要受土壤粉粒体积分数、分形维数 D 、土壤有机碳和全盐量的影响^[32]. 这些研究结果可为柴达木盆地盐化土壤的科学管理和合理开发利用提供参考.

青海省海西州西北部和海南州南部的3种地带性土壤栗钙土、棕钙土和灰棕漠土0-100 cm土层颗粒组成以粉粒(25%-75%)、砂粒(24%-73%)为主, 黏粒(0.2%-0.9%)含量较低, 土壤质地由粗到细依次为灰棕漠土、棕钙土、栗钙土^[33]. 随土层深度的增加, 灰棕漠土和棕钙土的粗土壤质地(高含量壤砂土和砂壤土)呈先增后降的趋势; 土壤颗粒分形维数 D 为2.18-2.42, 大小为栗钙土>棕钙土>灰棕漠土, 常随土层深度增加而增大^[33]. 柴达木盆地的棕钙土和灰棕漠土结构较粗, 应增加有机物料的投入, 配套合理灌溉模式, 加强土壤结构改良. 该研究可为青海省农业土地资源的合理利用提供参考.

灌溉和施肥是保障干旱区绿洲农业高产的关键, 但可能增加农业面源污染的风险. 王丽莎等人的研究显示, 在西北干旱地区黑河灌区, 灌溉后土壤溶液硝态氮(NO_3^- -N)浓度在表层土中迅速增加, 在深层土中稳定增加, 新绿洲(连续开垦24年)农田土壤溶液 NO_3^- -N浓度比老绿洲(连续开垦56年)农田提前1-2 d到达峰值^[34]. 老绿洲农田0-200 cm土层 NO_3^- -N净累积量为34.5 kg/hm², 显著高于新绿洲农田的17.6 kg/hm². 新绿洲农田深层渗漏水量和 NO_3^- -N淋失量分别比老绿洲农田高2.75和2.06倍, 农田玉米氮素回收量为198.2和255.5 kg/hm², 分别占氮肥投入总量的60.1%和77.4%^[34]. 含沙量高的砂质农田不利于水分和氮的保持, 导致新绿洲农田作物产量和氮肥利用效率较低. 因此, 需要加强干旱区砂质农田管理, 增施有机肥, 改善土壤结构, 科学施用化肥, 提高氮肥利用效

率,减少面源污染。

秸秆是指作物除籽粒等收获器官之外的剩余部分,富含纤维素和养分元素(氮、磷、钾等),含硫量低^[35],是农田土壤重要的有机质来源。宋大刚等人的研究表明,青藏高原各地区玉米秸秆资源量呈增加趋势,资源累计总量高达2 119.11万t,主要分布在四川省、青海省和云南省迪庆州^[36]。秸秆养分(氮、磷、钾)累计总量达49.37万t;青藏高原区内的玉米秸秆氮、磷、钾养分资源呈由北向南上升的趋势,南部的四川省凉山州养分资源最丰富^[36]。各地秸秆替代化肥潜力变化趋势相同,替代潜力为钾肥>氮肥>磷肥;凉山州的氮、磷、钾肥可替代量增加值最大,增长率93.37%;甘肃省甘南州的氮、磷、钾肥可替代量增加值最小,增长率5.70%^[36]。因此,在玉米秸秆和养分资源量较丰富的地区倡导推广秸秆还田技术,提高玉米秸秆还田利用率;结合玉米秸秆还田养分释放前期快、后期缓慢的特点,在秸秆还田后期适当补充矿质肥料。这些研究结果为青藏高原不同区域就地利用农业废弃物,减少化肥使用量和秸秆焚烧现象,提高秸秆还田利用效率,提升农田土壤有机质提供了依据。

2.3 青藏高原农业生产潜力与作物生长

本期专题报道该方面论文5篇,涵盖作物生产潜力、气候对作物生长的影响以及恶性杂草扩散等领域。

青藏高原作为我国重要的高寒农牧区,对其主要作物生产潜力进行评估,有利于保障区域粮食安全和促进农业可持续发展。王梦溪等人估算了1990-2020年青藏高原主要农作物青稞、小麦和油菜的生产潜力,3种作物的平均生产潜力整体呈上升趋势,青稞平均生产潜力从3 240.85 kg/hm²增长到4 427.61 kg/hm²,小麦平均生产潜力从4 633.055 kg/hm²增长到6 373.54 kg/hm²,油菜平均生产潜力从1 900.14 kg/hm²增长到2 603.62 kg/hm²^[37]。高产区范围持续扩大,低产区范围显著缩小;高产区主要分布于东南部和东北部适宜的种植区域,而低产区则集中在藏北高原和三江源地区^[37]。温度是影响作物生产潜力的关键因子,且与水分、风速等因子的协同作用显著增强了作物生产潜力的空间异质性^[37]。该研究表明青藏高原农作物生产潜力仍有挖掘空间,可为青藏高原地区农业种植业应对气候变化、提高区域作物产能提供理论依据。

气候变化导致降水的时空分布不均匀,部分区域干旱强度增强、频率升高。王庆莉等人研究发现四川省甘孜州各县(市)青稞全生育期干旱平均持续日数为37-68 d;抽穗到成熟期干旱持续日数和干旱覆盖范围呈上升趋势;播种到分蘖阶段干旱发生频率为61%,全生育期干旱频率为83%^[38]。全生育期干旱强度呈自南向北逐渐递减趋势,西南部干旱强度高值中心是强度变化最敏感区域;青稞分蘖到抽穗期危险性处于中高等级的面积较大,各生育期干旱危险性中高等级分布于西南部,干旱危险性由东北向西南逐渐升高^[38]。研究表明甘孜州青稞分蘖到抽穗期中高风险等级面积较大,受干旱的影响较大,其间青稞处于营养生长到生殖生长阶段,需加强干旱监测并及时补水。得荣县在青稞全生育期均出现高级干旱危险性,稻城、巴塘、乡城三县在部分生育期出现高级干旱危险性,这是甘孜州西南部青稞单位面积产量相对较低的重要因素。这些结果可为甘孜州农田水利建设布局、种植制度和模式优化、种植结构调整、防旱减灾技术应用以及节水高效农业建设等提供参考。

克瑞森是攀西地区主栽葡萄品种,其开花坐果期受高温热害的影响日益严重。王建端等人研究发现大棚增温受太阳

辐射的影响,白天增温显著,在晴天和多云天气条件下,极易出现高温;天气晴热程度、地形小气候、大棚结构和周边环境对棚内气温影响较大;棚内高温过程有害积热与克瑞森葡萄坐果率呈显著线性下降关系,坐果率≤46%可导致葡萄产量减少,坐果率发生轻度、中度、重度等级损失的有害高温累积温度阈值分别为34.3℃、72.1℃和124.4℃,对应的理论产量损失率依次为<10%、10%-29%、≥30%^[39]。该研究可为有效防控克瑞森葡萄开花坐果期高温热害、合理安排葡萄生产活动以及大棚湿度调控提供科学依据。

芒果(*Mangifera indica*)是我国热带重要水果之一^[40],气候变化导致倒春寒和干热风等极端天气频发,严重影响芒果授粉与坐果。刘馨语等人发现温度和持续时间对‘椰香芒’花粉活力有明显的影响,‘椰香芒’花粉萌发的最适温度为21.9-30.3℃,对低温比高温更敏感;在相同温度胁迫下,累计时间逐渐增加时,花粉失活温度区间逐渐扩大,花粉萌发率逐渐降低^[41]。此项研究为芒果花粉对温度胁迫的响应提供了新的认识,有助于预测气候变化对芒果产量的影响,可为后续芒果品种选育和芒果栽培管理提供参考。

旱雀麦(*Bromus tectorum*)是青藏高原农田中的恶性杂草之一,其适宜生境广泛、扩散蔓延迅速、发生危害严重,预测其未来气候变化情景下在青藏高原的潜在适生区分布及变化,可有效防范其种群扩张、对靶制定高效防控措施。杨振扬等人研究发现影响旱雀麦在青藏高原适生区分布的关键因子是人类活动影响强度指数、最湿季节平均温度和降水季节性变化。当前气候情景下,旱雀麦在青藏高原适生区总面积达到114.48×10⁴ km²,主要分布在云南、四川、甘肃、青海东部、西藏南部及阿里南部部分地区^[42]。未来气候情景下旱雀麦在青藏高原的适生区呈扩增趋势,总体上向西南迁移^[42]。因此,有必要对高适生扩散区域加强动态监测,并及时采取综合防治措施,减少杂草对作物生长和产量的影响。

2.4 作物品质和加工利用技术

本期专题收录该领域4篇论文,涉及特色农作物的品质及加工利用等。

β-葡聚糖是一种半纤维素类物质,在大麦和燕麦籽粒中含量较高,具有重要的保健功能,如降低血浆胆固醇^[43]、预防相关疾病^[44-45]以及调节肠道菌群^[46]等。王昕慧等人对大麦/青稞β-葡聚糖的分子结构和含量差异及其分子机理、物化特性、生理功能及与加工利用的相互影响等研究进展进行了梳理,发现近年来通过对大麦/青稞β-葡聚糖的研究已发现一些影响大麦/青稞β-葡聚糖含量的关键基因,不同品种中的β-葡聚糖含量、结构及物化特性存在差异,改性可以改变β-葡聚糖的结构和物化特性,丰富其功能^[47]。不同的大麦/青稞加工方式显著改变β-葡聚糖的结构和物化特性。然而,这些研究缺乏系统性,涉及面较窄且碎片化。未来需加强大麦/青稞β-葡聚糖提取方法的研究,提高提取效率和β-葡聚糖结构完整性;同时,应加强大麦/青稞品种间β-葡聚糖含量和结构差异的分子机理研究,深入研究谷物加工对β-葡聚糖的影响及其在加工中的变化。该综述可为青稞品质育种、高质产品的研发以及β-葡聚糖的开发利用提供参考。

小麦(*Triticum aestivum*)是世界上最重要的粮食作物之一,提供全球20%的蛋白质来源^[48],在粮食安全和蛋白质供应方面发挥着重要作用^[49]。燕欣瑶等人发现青藏高原小麦蛋白质含量平均值为11.3%,变幅7.2%-17.1%;低蛋白质含量小麦的分布最广,在西藏、甘肃和青海分别占可种植面积的

97.85%、94.18%和57.14%，在藏东南、一江两河、河西走廊和柴达木盆地分别占可种植面积100%、99.89%、89.19%和75.16%^[50]。小麦蛋白质含量在水平方向呈北高南低，与纬度呈正相关，在垂直方向随海拔升高而降低；影响小麦蛋白质含量的环境因子主要是土壤因子和气候因素，其次是地理因子^[50]。该研究结果可为青藏高原优质小麦定向培育提供依据，例如大力发展弱筋专用小麦，在一江两河、藏东南、河西走廊等地打造高原特色饼干、糕点专用弱筋小麦种植区等。

青稞 (*Hordeum vulgare* var. *nudum*) 是我国藏区特色鲜明的高原谷类作物，是藏区人民的主要粮食和食品加工原料^[51-52]。杨春娇等人研究发现3个青稞品种(藏青18、藏青2000和藏青3000)的营养品质和加工特性具有显著差异，糯青稞藏青18全麦粉在 β -葡聚糖、总黄酮和总酚这3种营养成分上优势明显，但其面粉糊化的峰值时间短、峰值温度低，面粉糊化快，面条不耐蒸煮、黏度大、口感黏牙、品质欠佳；青稞藏青2000全麦粉在总淀粉和直链淀粉含量上的优势突出，藏青3000全麦粉在蛋白质含量上优势明显，两者面粉糊化较糯青稞慢，面条蒸煮性好、黏性低、弹性和咀嚼性好^[53]。不同粒度面粉及其面条的品质也存在显著差异，随着粒度减小，面粉的营养物质损失较大，但粒度小的面粉制作的面条色泽、光滑性和总评分均较高，口感更好且更耐煮，因此粒度较大的面粉制作的面条营养品质较高，粒度较小的面粉制作的面条蒸煮品质和感官品质更好。这些研究明确了糯青稞和普通青稞在面条加工应用上的差异，可为青稞的加工利用提供依据。

根用佛手瓜是葫芦科植物佛手瓜 (*Sechium edule*) 地下块根的膨大部分，具有特殊的营养和保健功能，在代替其他淀粉食品方面具有一定的潜力^[54-55]。邵大龙等人发现贮藏温度显著影响根用佛手瓜块根的淀粉-糖转化和抗氧化活性：4℃条件下，淀粉降解最快，糖含量上升迅速，抗氧化活性最强；20℃条件下，淀粉降解最慢，抗氧化活性最弱，但出现生根现象，影响其商品性；10℃和15℃条件下，淀粉-糖转化和抗氧化活性相对适中，块根品质得到较好保持，可作为根用佛手瓜块根的最佳贮藏温度区间^[56]。由于贮藏湿度较低，块根的含水量及失重率都有所增加，适当提高贮藏湿度至80%-95%，可有效保持块根含水量。在不使用保鲜剂的情况下，若需较高淀粉含量的产品，可在采后立即加工或在贮藏前14 d内处理；若需较高糖含量的产品，可在贮藏21 d后加工。此研究为根用佛手瓜块根贮藏和加工利用提供了参考。

2.5 种质资源及病原菌群

青稞、小麦、玉米、燕麦和糜子作为重要的农作物，其遗传多样性、病害防控及微生物群落研究对于农业生产和粮食安全具有重要意义。本期专题收录5篇相关研究论文。

邓超等人报道了在大麦(青稞)中克隆*HvCDS1*基因，通过与其他物种的同源蛋白比对发现，这些蛋白都具有胞苷酰转移酶结构域，表明蛋白功能保守，主要调节膜磷脂组成变化，对植物生长发育和应对环境胁迫具有重要意义^[57]。进一步研究发现，在4℃(冷害)和-4℃(冻害)条件下处理青稞幼苗4 h后，*HvCDS1*基因显著上调表达，说明其能快速响应低温胁迫，与青稞抗寒性密切相关。启动子在基因表达调控中具有重要作用，此研究克隆获得*HvCDS1*起始密码子上游2 000 bp的启动子序列，富含多个与激素和非生物胁迫相关的顺式作用元件，例如ARE、ABRE、TGA-element、P-box元件等，意味着该基因在参与植物对低温胁迫应答的同时也与激素信号的调控有关，这一推测需通过进一步研究该基因表达与激素响

应模式来验证。这些研究结果可为将*HvCDS1*应用于青稞耐低温育种提供一定的理论基础。

小麦种植面积超过青藏高原作物总播种面积的30%^[58]，但海拔对小麦内生真菌群落的影响研究尚属空白。吴芳等人研究发现青藏高原东北部小麦内生真菌种类丰富，但海拔组间 α 多样性指数差异不显著；不同海拔组间的优势菌种不同，低海拔组的优势菌属为链格孢菌属(*Alternaria*)，中海拔组的优势菌属为附球菌属*Epicoccum*、枝孢属*Cladosporium*、链格孢菌属*Alternaria*，高海拔组的优势菌属为*Lasioneectria*、*Paraconiothyrium*、曲霉属(*Aspergillus*)和枝孢属(*Cladosporium*)； β 多样性分析表明低海拔组样品间相似度较高；种子内生真菌包括潜在的有益功能菌种属和多种种传病害病原菌^[59]。该研究结果可为青藏高原小麦有益真菌的利用和种传病害的防治提供参考。

玉米(*Zea mays*)是我国重要的粮饲兼用型作物，在国民经济、农业及粮食安全中具有举足轻重的地位。玉米瘤黑粉病(*Ustilago maydis*)是危害玉米的系统性病害，消耗植株养分，导致植株矮小扭曲甚至不结实，造成严重减产^[60]。常卫格等人报道甘肃省存在玉米瘤黑粉病原菌mfa1、mfa2和mfa1+mfa2等3种交配型，这些交配型与其地理来源没有直接关系。玉米瘤黑粉病菌可随气流传播，相邻地区间的病原菌存在基因交流，地理距离越近，则种群间的遗传相似度越高^[61]。陇东和陇中地区夏季相对干旱，导致这些地区玉米瘤黑粉病菌遗传多样性较高。不同地域的菌株间存在差异性，这与地理环境、气候条件、品种抗性及种子带菌等因素有关。该研究对于玉米瘤黑粉病的病菌遗传致病机制研究及其预防和治理具有重要参考价值。

燕麦(*Avena sativa*)可分为皮燕麦(带稃型)和裸燕麦(裸粒型)^[62-63]，主要分布在西北、西南、华北、东北等高原或高海拔地区^[64]，是青藏高原乃至全国重要的饲草作物。燕麦经长期选择形成不同生态型和优良群体，研究燕麦种质资源的遗传多样性有利于燕麦功能基因挖掘和新品种选育。唐有林等人研究发现276份燕麦种质资源具有丰富的遗传多样性，株高、穗粒数遗传多样性指数最高，穗铃数和穗粒数变异系数最大；各表型性状的遗传力较高，这些表型性状可在育种过程的早期进行世代选择；11个表型性状可归纳为3个主要表型因子：籽粒大小因子、株型因子和粒型因子；筛选出优质皮燕麦(Xin Yuan)和裸燕麦(Chih Chi Tiao Mai)^[65]。该项研究可为燕麦选育提供依据。

糜子(*Panicum miliaceum*)属禾本科黍属，是一年生草本谷类作物，具有耐盐碱、耐干旱、耐贫瘠以及生长期较短等特点，广泛分布于我国干旱和半干旱地区^[66]。植物CPP(cystein-rich polycomb-like protein or Tesmin/TOS1-like)是一类家族成员数目较少的转录因子基因家族，广泛存在于各种真核生物的基因组中，对植物生长发育尤其是穗发育起着重要的调节作用。李蕊敏等人利用糜子的泛基因组数据鉴定CPP基因家族，获得33个糜子CPP家族基因，并对其结构变异、系统进化、染色体分布、保守基序、共线性及Ka/Ks比值、结构变异与穗长性状的关系及在穗发育阶段的表达水平进行了分析，为CPP家族基因的分子机制解析、功能分析和应用提供了参考依据，有助于糜子新品种的选育^[67]。

2.6 温室气体减排和碳平衡

农业生产是温室气体排放的重要来源，对气候变化具有明显的影响。本期专题有2篇论文涉及温室气体^[68]和碳平

衡^[69].

IPCC的研究表明,农业生产活动所产生的 N_2O 和 CH_4 分别占人类活动排放温室气体总量的70%和52%^[70].在全球气候变暖的背景下,农业源非 CO_2 温室气体排放日益受到关注,但对以畜牧业为主的西北地区缺乏大范围、长时间尺度的相关研究.刘承琦等人研究表明,2006-2021年青海省农业源非 CO_2 温室气体排放总量整体呈上升趋势,由2006年的1 475.03万吨 CO_2 当量上升至2021年的1 895.31万吨 CO_2 当量,增长28.49%;排放总量在2020年达到峰值1 910.22万吨 CO_2 当量;在青海省农业源非 CO_2 温室气体排放总量中,畜牧业占比达94.08%,种植业占比5.92%^[68].针对青海省农业源非 CO_2 温室气体整体增长趋势,可通过改善饲料配方、提高吸收利用率以及建立沼气工程等措施来减缓其排放量的增长.

农田生态系统兼有碳源和碳汇功能,对维持生态系统碳平衡具有重要意义.李旗等人报道了在1988-2018年期间,青藏高原农田生态系统碳排放量增加了133.38%,化肥施用是其最大的排放源;碳吸收量增加88.39%,青稞和小麦是主要的碳吸收作物;农田生态系统的碳足迹增长率达61.05%,单位面积碳足迹增长53.11%^[69].近30年青藏高原农田生态系统处于碳盈余状态,但碳固存能力随时间推移而降低;农作物产量、农业人口数和有效灌溉面积是对青藏高原农田生态系统碳足迹贡献最大的正向驱动因子,而农业产业结构和机械化水平对碳足迹具有抑制作用.该研究结果可为青藏高原农业碳汇经营管理提供参考.

3 展望

科考团队将按照既定的科考目标和工作方案持续开展科学考察研究,紧密围绕探索变化、揭示机理、预测未来、提出方案这一科学考察研究思路,强化植被、土壤、作物产量、经营管理要素等科考数据的整合分析与系统集成,以形成区域尺度的研究成果.

青藏高原作为全球气候变化的晴雨表,应继续关注气候变化对农业生产的影响,特别是极端天气(如高温、干旱、暴雨等)对作物生长和产量的潜在威胁.在全球气候变化的背景下,深入探索不同区域气候变化的时空特征,评估气候变化对

作物种植、土壤质量以及农田生态系统稳定性、弹性和恢复力的影响,增强高原农业的韧性.加强土壤资源的保护与合理利用,尤其是加强盐碱化、土壤侵蚀和氮素管理等方面的研究,关注土壤微塑料、重金属、氮磷、抗生素等的富集趋势,确保耕地质量稳中有升.秸秆回收利用及有机肥与无机肥结合的施肥模式将成为改善土壤质量、减少农业面源污染的重要途径,应加强秸秆还田配套技术研究.为更好地应对气候变化和土地退化等挑战,持续加强农田生态系统各项关键指标的长期监测,构建遥感技术、无人机技术、物联网、人工智能以及固定样地监测等全方位的农业生态监测系统体系,重点关注土壤生物、土壤生态的特征因子演变,优化农业资源的配置与高效利用,保障粮食安全,持续促进农牧民收入稳定增长.

青藏高原是重要的生态安全屏障和生物多样性保护的重点区域,农田生态系统与自然生态系统关系密切.未来的农业发展必须关注农业生产与生态系统保护间的协同效应,探讨森林、灌丛、草地对农田生态系统的影响,探索通过农田生态系统的优化和修复实现生态与生产双赢的路径或模式.农业生产可更多引入生态工程措施,如农田湿地恢复、农田生物多样性保护、合理混间套作模式应用等,恢复和保护农田的自然生态服务功能,增强其土壤保持、碳固定和水源涵养能力,减少农业对自然生态系统的负面影响.生态农业将成为青藏高原农业的一个重要发展方向,通过农业生态系统与自然生态系统的有机结合,既能提升农田生产力,又能保护和修复区域生态环境,推动农业开发与生态保护协同发展.

随着青藏高原生态环境的变化和农田生态系统的不断发展,未来农业应迈向多功能综合利用的道路,不仅要保障粮食生产,还要实现生态效益、经济效益与社会效益的统一.在青藏高原的农业发展中,积极推动农业、林业、牧业的融合发展,建设生态农业与多元化生产系统.例如,探索农业与水土保持、生态修复、景观保护等多重功能的结合,推动“农-林-牧”复合型生态系统建设.青藏高原的特色农作物如青稞、藏麦、藏豆等,具有独特的地域和文化价值.大力发展有机农业和绿色食品产业,提高产品附加值,融合发展生态旅游、森林休闲、特色农畜产品精深加工,促进乡村振兴和区域农业的可持续发展,保护和修复退化生态系统,构建更具韧性、适应性和可持续性的农林牧复合生态系统.

参考文献 [References]

- 张镡锂,李炳元,郑度.论青藏高原范围与面积[J].地理研究,2002,21(1):1-8 [Zhang YL, Li BY, Zheng D. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China [J]. *Geogr Res*, 2002, 21(1): 1-8]
- 田一聪,田明,刘劲松,魏金鹏.青藏高原人口空间分布格局及其演变特征[J].科技促进发展,2022,18(5):620-628 [Tian YC, Tian M, Liu JS, Wei JP. Spatial distribution pattern and evolution characteristics of population in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Sci Technol Dev*, 2022, 18(5): 620-628]
- 王梦溪,潘开文,伍小刚,孙晓铭,张林,潘志芬,陈龙飞.青藏高原耕地面积时空变化特征及其驱动因子[J].应用与环境生物学报,2022,28(4):859-868 [Wang MX, Pan KW, Wu XG, Sun XM, Zhang L, Pan ZF, Chen LF. Temporal and spatial patterns and driving factors of cultivated land change in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, 28(4): 859-868]
- 潘开文,何燕,唐亚伟,沈裕虎,张林,潘志芬.青藏高原农田生态系统与粮食安全科学考察研究专题进展[J].应用与环境生物学报,2022,28(4):813-821 [Pan KW, He Y, Tang YW, Shen YH, Zhang L, Pan ZF. Progress of the scientific expedition and research on farmland ecosystem and food security in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, 28(4): 813-821]
- Bai X, Shoaib N, Pan Z, Pan K, Sun X, Wu X, Zhang L. Occurrence characteristics and ecological impact of agricultural soil microplastics in the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *J Hazard Mat*, 2024, 480: 136413
- 赵金鹏,胡婧媛,郭翔,王庆,王茹琳,王明田.近50年青藏高原地区热量资源时空变化特征[J].应用与环境生物学报,2022,28(4):822-828 [Zhao JP, Hu JY, Guo X, Wang Q, Wang RL, Wang MT. Variation characteristics of thermal resources in Qinghai-Tibet Plateau in recent 50 years [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, 28(4): 822-828]
- 王姝,朱红秀,王明田.1961-2020年青藏高原湿润指数的时空演变

- 特征[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 836-843 [Wang S, Zhu HX, Wang MT. Spatial and temporal evolution characteristics of the humidity index in Qinghai-Tibet Plateau from 1961 to 2020 [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 836-843]
- 8 唐信英, 宋云帆, 王鸽, 王明田. 1970-2020年青藏高原近地面风速时空变化特征[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 844-850 [Tang XY, Song YF, Wang G, WANG MT. Spatial and temporal variation of near-surface wind speed over Qinghai-Tibet Plateau from 1970 to 2020 [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 844-850]
 - 9 叶帮苹, 张小丽, 王雅琦, 王明田, 赵金鹏. 1961-2020年青藏高原日照时数时空演变特征[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 851-858 [Ye BP, Zhang XL, Wang YQ, Wang MT, Zhao JP. Temporal and spatial evolution characteristics of sunshine duration over Qinghai-Tibet Plateau from 1961 to 2020 [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 851-858]
 - 10 王春学, 王明田, 王顺久. 青藏高原不同等级降水时空变化特征[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 829-835 [Wang CX, Wang MT, Wang SJ. Spatial and temporal variation characteristics of different grades of precipitation in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 829-835]
 - 11 申源, 邱鹏, 廖梓延, 伍小刚, 孙晓铭, 张林, 潘志芬, 潘开文. 气候变化下青藏高原农田杂草丰富度格局变化[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 897-908 [Shen Y, Qiu P, Liao ZY, Wu XG, Sun XM, Zhang L, Pan ZF, Pan KW. Changes in distribution patterns of weed species richness in agricultural lands on Qinghai-Tibet Plateau under climate change [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 897-908]
 - 12 申源, 廖梓延, 林可欣, 伍小刚, 张凤英, 张林, 潘开文. 基于多算法集合模型预测青藏高原3种常见恶性杂草未来入侵风险[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 909-919 [Shen Y, Liao ZY, Lin KX, Wu XG, Zhang FY, Zhang L, Pan KW. Predicting future invasion risk of three widespread malignant weeds on Qinghai-Tibet Plateau based on multi-algorithm ensemble models [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 909-919]
 - 13 崔洁, 杨泽鹏, 王思展, 唐晓琴, 王文峰. 西藏林芝地区农田瓢虫资源及优势种群动态[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 890-896 [Cui J, Yang ZP, Wang SZ, Tang XQ, Wang WF. Population dynamics of farmland ladybug resources and dominant species in Nyingchi, Tibet, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 890-896]
 - 14 黄佳, 杨甜, 李泽林, 周小婷, 贺忠群. 不同浓度四环素和土霉素对生菜生长的影响及生态毒性[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 995-1001 [Huang J, Yang T, Li ZL, Zhou XT, He ZQ. Effects of different concentrations of tetracycline and oxytetracycline on growth and ecotoxicity in lettuce [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 995-1001]
 - 15 王丽莎, 何志斌, 陈龙飞, 王川. 荒漠绿洲过渡带自然沙地开垦为灌溉农田后土壤硝化、反硝化速率及其影响因素[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 869-876 [Wang LS, He ZB, Chen LF, Wang C. Differences of soil nitrification and denitrification capacities following reclamation years of native desert soils to irrigated croplands in Hexi Corridor Region of Northwest China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 869-876]
 - 16 宋明丹, 李月梅, 塔林葛娃, 李凤桐. 青藏高原东部设施农区土壤肥力演变和氮磷淋失风险特征[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 877-882 [Song MD, Li YM, Talin Gewa, Li FT. Evolution of soil fertility quality and nitrogen/phosphorus leaching risk in protected agriculture of eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 877-882]
 - 17 寇涌苹, 张晓瑛, 赵文强, 汤娜. 青藏高原农田土壤氨氧化古菌和细菌数量与活性及其对氨氧化过程的贡献[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 883-889 [Kou YP, Zhang XY, Zhao WQ, Tang N. Quantity and activity of ammonia-oxidizing archaea and bacteria and their contributions to ammonia oxidation in farmland soil of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 883-889]
 - 18 王媚, 刘天鹏, 何继红, 董孔军, 任瑞玉, 张磊, 杨天育. 糜子**bZIP**基因家族鉴定与幼苗期聚乙二醇6000处理下的表达特征[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 920-930 [Wang M, Liu TP, He JH, Dong KJ, Ren RY, Zhang L, Yang TY. Genome-wide identification of *bZIP* gene family in broomcorn millet and analysis of its expression characteristics under polyethylene glycol treatment in seedling stage [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 920-930]
 - 19 边海燕, 张永兰, 王蕾, 徐金青, 王寒冬, 陈同睿, 尤恩, 邓超, 沈裕虎. 大麦**HvENOD93**基因家族的鉴定及表达特征[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 954-963 [Bian HY, Zhang YL, Wang L, Xu JQ, Wang HD, Chen TR, You E, Deng C, Shen YH. Identification and expression analysis of the *HvENOD93* gene family in barley [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 954-963]
 - 20 谢容, 李俏, 张云书, 张跃雁, 肖富彤, 张玉红, 潘志芬. 不同剥皮次数对青稞米品质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 971-981 [Xie R, Li Q, Zhang YS, Zhang YY, Xiao FT, Zhang YH, Pan ZF. Effect of different pearling times on the quality of hull-less barley rice [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 971-981]
 - 21 翟会生, 李俏, 刘廷辉, 除多, 肖富彤, 谢容, 杨开俊, 潘志芬. 青稞燕麦糕与小麦燕麦糕的品质差异[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 982-988 [Zhai HS, Li Q, Liu TH, Chuduo, Xiao FT, Xie R, Yang KJ, Pan ZF. Differences in the quality of steamed hull-less barley and wheat cakes [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 982-988]
 - 22 王寒冬, 张永兰, 王蕾, 徐金青, 陈同睿, 沈裕虎. 不同栽培措施对青海东部山旱地饲用燕麦干草产量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 964-970 [Wang HD, Zhang YL, Wang L, Xu JQ, Chen TR, Shen YH. Effect of different cultivation measures on forage oat yield in the eastern mountain dryland of Qinghai Province [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 964-970]
 - 23 张瑞洁, 贺忠群, 李春燕, 莫建超, 谢永东. 植物工厂中光周期对番杏光合特性及品质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 989-994 [Zhang RJ, He ZQ, Li CY, Mo JC, Xie YD. Effects of photoperiod on photosynthetic characteristics and quality of *Tetragonia tetragonoides* (Pall.) Kuntze in plant factory [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 989-994]
 - 24 刘国一, 普布贵吉, 甘雅文, 扎西罗布, 唐亚伟. 2010-2019年西藏粮食增产的贡献因素[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 931-934 [Liu GY, Pubu Guiji, Gan YW, Zhaxi Luobu, Tang YW. Factors contributing to increasing grain production from 2010 to 2019 in Tibet, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 931-934]
 - 25 吴芳, 马文波, 李涛, 燕欣瑶, 马小林, 唐淑, 张富有. 西藏小麦生产的时空格局及影响因素[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 945-953 [Wu F, Pan ZF, Li T, Yan XY, Ma XL, Tang S, Zhang FY. Spatio-temporal patterns and other impacting factors on wheat production in Tibet, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 945-953]
 - 26 吴芳, 潘志芬, 李涛, 燕欣瑶, 马小林, 唐淑, 张富有. 西藏县域农作物种植结构时空变化及专业化分区[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28** (4): 935-944 [Wu F, Pan ZF, Li T, Yan XY, Ma XL, Tang S, Zhang FY. Spatial evolution and specialization division of crop planting structure in counties of Tibet, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, **28** (4): 935-944]
 - 27 王春学, 王明田, 王顺久, 谢娜. 青藏高原雨涝指数时空变化特征[J].

- 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1064-1071 [Wang CX, Wang MT, Wang SJ, Xie N. Characteristics of spatial and temporal variations in the flood-waterlogging index on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1064-1071]
- 28 魏挪巍, 王明田, 赵金鹏, 王春学. 1961-2019年青藏高原积雪时空变化特征及其影响因素[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1072-1084 [Wei NW, Wang MT, Zhao JP, Wang CX. Spatiotemporal variation characteristics and influencing factors of snow cover over the Qinghai-Xizang Plateau during 1961-2019 [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1072-1084]
- 29 赵金鹏, 刘秀, 沈洁红, 王茹琳, 王明田. 1971-2020年青藏高原高温日数及高温热浪时空变化特征[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1085-1092 [Zhao JP, Liu X, Shen ZH, Wang RL, Wang MT. Space-time variation characteristics of hot days and heatwaves in the Qinghai-Xizang Plateau from 1971 to 2020 [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1085-1092]
- 30 王姝, 车路鹏, 朱红秀, 王明田. 1961-2020年青藏高原作物生长季气象干旱时空变化特征[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1093-1100 [Wang S, Che LP, Zhu HX, Wang MT. Temporal and spatial variation characteristics of meteorological drought in the crop growing season in Qinghai-Xizang Plateau from 1961 to 2020 [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1093-1100]
- 31 Zhou Y, Chen S, Hu BJ. Global soil salinity prediction by open soil Vis-NIR spectral library [J]. *Remote Sens*, 2022, **14** (21): 5627
- 32 王鸿霞, 操一芸, 宋明丹, 塔林葛娃, 王乾冰, 刘承琦, 李月梅. 柴达木盆地不同盐化土壤粒级组成及可蚀性[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1101-1107 [Wang HX, Cao YY, Song MD, Talin Gewa, Wang GB, Liu CQ, Li YM. Particle size distribution and erodibility of soils under different salinization levels in the Qaidam Basin [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1101-1107]
- 33 王鸿霞, 宋明丹, 塔林葛娃, 李月梅, 王乾冰, 刘承琦. 青海省3种地带性土壤粒径分形特征[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1108-1114 [Wang HX, Song MD, Talin Gewa, Li YM, Wang QB, Liu CQ. Fractal characteristics of particle size in three zonal soils of Qinghai Province, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1108-1114]
- 34 王丽莎, 陈龙飞, 罗德伟, 何志斌, 何晓丽. 河西走廊荒漠绿洲农田氮素吸收、残留与淋失特征[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1115-1123 [Wang LS, Chen LF, Luo DW, He ZB, He XL. Nitrogen uptake, surplus, and leaching in desert oasis fields in the Hexi Corridor in northwestern China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1115-1123]
- 35 贺仁飞. 中国生物质能的地区分布及开发利用评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2013 [He RF. Regional distribution and evaluation of development and utilization of biomass energy in China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013]
- 36 宋大刚, 胡晗颖, 卢兰, 冯海军. 1988-2018年青藏高原玉米秸秆资源时空分布特征及还田替代化肥潜力[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1124-1132 [Song DG, Hu HY, Lu L, Feng HJ. Characteristics of spatial and temporal distribution of maize straw resources and the potential of returning as chemical fertilizer in the Qinghai-Xizang Plateau, 1988-2018 [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1124-1132]
- 37 王梦溪, 格桑卓玛, 潘志芬, 孙晓铭, 伍小刚, 潘开文, 王学经, 刘佳林, 金秋雨, 郭子安, 张林. 青藏高原主要农作物生产潜力及其影响因素[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1133-1141 [Wang MX, Gesang Zhuoma, Pan ZF, Sun XM, Wu XG, Pan KW, Wang XJ, Liu JL, Jin QY, Guo ZA, Zhang L. Production potential of the main crops grown on the Qinghai-Xizang Plateau and the influencing factors [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1133-1141]
- 38 王庆莉, 李璐, 敖泽建, 多杰措, 项朝军, 王明田, 李素贞, 唐山川. 甘孜州青稞生育期气象干旱及其危险性[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1142-1151 [Wang QL, Li L, Ao ZJ, Duoje Cuo, Xiang CJ, Wang MT, Li SZ, Tang SC. Meteorological drought and disaster risk during the growth period of highland barley in Ganzi Prefecture, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1142-1151]
- 39 王建婧, 王明田, 王姝, 刘大章, 张飒, 房鹏. 西昌克瑞森葡萄开花坐果期高温热害指标及大棚内日最高气温预报模型构建[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1152-1160 [Wang JQ, Wang MT, Wang S, Liu DZ, Zhang S, Fang P. Construction of the heat injury index and daily maximum temperature prediction model in greenhouse for Xichang Crimson grape during flowering and fruiting period [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1152-1160]
- 40 Pearson PN, Palmer MR. Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years [J]. *Nature*, 2000, **406** (6797): 695-699
- 41 刘馨语, 梁清志, 祁小利, 王明田. 温度胁迫对‘椰香芒’花粉萌发率和花粉管生长的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1161-1166 [Liu XY, Liang ZQ, Qi XL, Wang MT. Effects of temperature stress on the rate of pollen germination and pollen tube growth in ‘Dashehari’ [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1161-1166]
- 42 杨振扬, 张得芳, 魏有海, 程亮, 郭良芝, 刘泽渊. 基于Biomod2组合模型预测旱雀麦种群在青藏高原的潜在分布[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1167-1175 [Yang ZY, Zhang DF, Wei YH, Chen L, Guo LZ, Liu ZY. Prediction of *Bromus tectorum* L. population distribution in the Qinghai-Xizang Plateau based on Biomod2 ensemble model [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1167-1175]
- 43 Li Y, Zhu K, Guo X, Peng W, Zhou H. Interaction of barley β -D-glucan with wheat starch: effect on the pasting and rheological properties [J]. *Int J Biol Macromol*, 2016, **92**: 70-76
- 44 Hallfrisch J, Scholfield DJ, Behall KM. Physiological responses of men and women to barley and oat extracts (Nu-trimX). II. Comparison of glucose and insulin responses [J]. *Cereal Chem*, 2003, **80** (1): 80
- 45 Hlebowicz J, Darwiche G, Björgell O, Almér L-O. Effect of muesli with 4 g oat β -glucan on postprandial blood glucose, gastric emptying and satiety in healthy subjects: a randomized crossover trial [J]. *J Am Coll Nutr*, 2008, **27** (4): 470-475
- 46 Zhu F, Du B, Xu B. A critical review on production and industrial applications of beta-glucans [J]. *Food Hydrocoll*, 2016, **52**: 275-288
- 47 王昕慧, 刘娟, 李俏, 贺宏, 张智慧, 赵天怡, 李雨童, 蔡婧驰, 张玉红, 潘志芬. 大麦/青稞 β -葡聚糖研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1176-1188 [Wang XH, Liu J, Li Q, He H, Zhang ZH, Zhao TY, Li YT, Cai JC, Zhang YH, Pan ZF. Study on barley β -glucan: a review [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1176-1188]
- 48 David T, Christian B, Jason H, Belinda LB. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture [J]. *PNAS*, 2011, **108** (50): 20260-20264
- 49 孔祥飞, 李超, 杨广, 侯冠群, 柳为, 许新港, 欧阳竹, 侯瑞星. 基于Meta分析研究气候变化对中国小麦籽粒蛋白质含量的影响[J]. 农业工程学报, 2023, **39** (11): 118-127 [Kong XF, Li C, Yang G, Hou GQ, Liu W, Xu XG, Ou YZ, Hou RX. Effects of climate change on the protein content of wheat grains in China using meta-analysis [J]. *Trans. Chin Soc Agric Eng*, 2023, **39** (11): 118-127]
- 50 燕欣瑶, 吴芳, 张远鹏, 赵芹, 杨晨艺, 潘志芬. 青藏高原小麦蛋白质含量的影响因素及空间分布特征[J]. 应用与环境生物学报, 2024,

- 30 (6): 1189-1197 [Yan XY, Wu F, Zhang YP, Zhao Q, Yang YC, Pan ZF. Influencing factors and spatial distribution characteristics of wheat in Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1189-1197]
- 51 Zeng XQ, Guo Y, Xu QJ, Mascher M, Guo GG, Li SC, Mao LK, Liu QF, Xia ZF, Zhou JH, Yuan HJ, Tai SS, Wang YL, Wei ZX, Song L, Zha S, Li SM, Tang YW, Bai LJ, Zhuang ZH, He WM, Zhao SC, Fang XD, Gao Q, Yin Y, Wang J, Yang HM, Zhang J, Henry RJ, Stein N, Tashi N. Origin and evolution of qingke barley in Tibet [J]. *Nat Commun*, 2018, **9** (1): 5433
- 52 Liu J, Li Q, Zhai HS, Zhang YH, Zeng XQ, Tang YW, Nyima TS, Pan ZF. Effects of the addition of waxy and normal hull-less barley flours on the farinograph and pasting properties of composite flours and on the nutritional value, textural qualities, and in vitro digestibility of resultant breads [J]. *J Food Sci*, 2020, **85** (10): 3141-3149
- 53 杨春娇, 肖富彤, 李俏, 赵天怡, 张智慧, 陈多, 张玉红. 3个青稞品种不同粒度面粉和面条的品质差异[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1198-1206 [Yang CJ, Xiao FT, Li Q, Zhao TY, Zhang ZH, Chu D, Zhang YH, Pan ZF. Effect of flour particle size on quality of barley flour and noodles: assessment of three highland varieties [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1198-1206]
- 54 Vieira FE, Pinho O, Ferreira MI, Matos-D C. Chayote (*Sechium edule*): a review of nutritional composition, bioactivities and potential applications [J]. *Food Chem*, 2019, **275**: 557-568
- 55 Su LH, Cheng SB, Liu YH, Xie YD, He ZQ, Jia MY, Zhou XT, Zhang RJ. Transcriptome and metabolome analysis provide new insights into the process of tuberization of *Sechium edule* roots [J]. *Int J Mol Sci*, 2022, **23** (12): 6390-6390
- 56 邵大龙, 郭鑫, 秦艳梅, 鲁颖异, 贺忠群, 周小婷. 不同贮藏温度对根用佛手瓜块根淀粉-糖转化与抗氧化性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1207-1213 [Shao DL, Guo X, Qin YM, Lu YY, He ZQ, Zhou XT. Effects of different storage temperatures on starch-sugar conversion and antioxidant activity of chayote roots (*Sechium edule* (Jacq.) Swartz) [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1207-1213]
- 57 邓超, 王蕾, 徐金青, 黄志伟, 王寒冬, 陈同睿, 尤恩, 边海燕, 唐有林, 沈裕虎. 青稞HvCDS1基因的克隆与表达特征[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1214-1221 [Deng C, Wang L, Xu JQ, Huang ZW, Wang HD, Chen TR, You E, Bian HY, Tang YL, Shen YH. Cloning and expression characteristics of HvCDS1 gene in hullless barley [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1214-1221]
- 58 张泽民, 吕昌河. 青藏高原不同积温条件下春小麦光温生产潜力及其对气候变化的响应[J]. 中国农业科学, 2022, **55** (11): 2135-2149 [Zhang ZM, Li CH. Photo-temperature potential yield of spring wheat at different accumulated temperature ranges and its response to climate change in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Sci Agric Sin*, 2022, **55** (11): 2135-2149]
- 59 吴芳, 杨晨艺, 张远鹏, 先梦娜, 王僖苗, 鲜豪, 潘志芬, 蒲青青. 青藏高原东北部不同海拔小麦种子内生真菌多样性[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1222-1229 [Wu F, Yang CY, Zhang YP, Xian MN, Wang XM, Xian H, Pan ZF, Pu QQ. Fungal diversity in wheat seeds at different altitudes in the northeastern Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1222-1229]
- 60 鄂文弟, 王振华, 张立国, 张林, 王霞, 孙广权. 玉米瘤黑粉病的研究进展[J]. 玉米科学, 2006, **14** (1): 153-157 [E WD, Wang ZH, Zhang LG, Zhang L, Wang X, Sun GQ. The advances in the research of common smut in maize [J]. *J Maize Sci*, 2006, **14** (1): 153-157]
- 61 常卫格, 高建昊, 张小杰, 洪流, 王林英, 周天旺, 王春明, 郭成. 甘肃省玉米瘤黑粉病菌交配型及遗传多样性[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1230-1235 [Chang WG, Gao JH, Zhang XJ, Hong L, Wang LY, Zhou TW, Wang CM, Guo C. Mating type and genetic diversity of *Ustilago maydis* in Gansu Province, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1230-1235]
- 62 李鸿飞, 周帮伟, 张淼, 施树楠, 李志坚. 不同燕麦品种在呼伦贝尔地区的引种适应性评价[J]. 草业学报, 2024, **33** (4): 60-72 [Li HF, Zhou BW, Zhang M, Shi SN, Li ZJ. Adaptability evaluation of different oat varieties introduced in the Hulunbuir region [J]. *Acta Pratac Sin*, 2024, **33** (4): 60-72]
- 63 任长忠, 胡跃高. 中国燕麦学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013: 1-2 [Ren CZ, Hu YG. Chinese Oatology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013: 1-2]
- 64 王星宇, 程静, 高生, 李默涵, 杨满霞, 葛军勇, 周海涛, 李云霞, 臧华栋, 左文博. 应用AMMI模型和GGE双标图评价裸燕麦品种在华北高寒区的适应性[J]. 草业学报, 2022, **31** (12): 76-84 [Wang XY, Cheng J, Gao S, Li MH, Yang MX, Ge YJ, Zhou HT, Li YX, Zang HD, Zuo WB. Evaluation of adaptability of naked oat varieties in the alpine region of North China based on the AMMI model and GGE Biplot [J]. *Acta Pratac Sin*, 2022, **31** (12): 76-84]
- 65 唐有林, 王蕾, 王寒冬, 徐金青, 边海燕, 陈同睿, 尤恩, 邓超, 卢露, 王一航, 沈裕虎. 燕麦种质资源表型多样性及综合评价[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1236-1244 [Tang YL, Wang L, Wang HD, Xu JQ, Bian HY, Chen TR, You E, Deng C, Lu L, Wang YH, Shen YH. Phenotypic diversity analysis and comprehensive evaluation of oat germplasms [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1236-1244]
- 66 王倩, 董孔军, 薛亚鹏, 刘少雄, 王若楠, 杨佳琪, 陆平, 王瑞云, 杨天育, 刘敏轩. 糜子核心种质成株期抗旱性鉴定评价与抗旱种质筛选[J]. 中国农业科学, 2023, **56** (21): 4163-4174 [Wang Q, Dong KJ, Xue YP, Liu SX, Wang RN, Yang JQ, Lu P, Wang RY, Yang TY, Liu MX. Identification and evaluation of drought tolerance and screening of drought-tolerant germplasm for core germplasms in proso millet at adult stage [J]. *Sci Agric Sin*, 2023, **56** (21): 4163-4174]
- 67 李蕊敏, 刘天鹏, 何继红, 董孔军, 张磊, 李亚伟, 杨天育. CPP基因家族在糜子泛基因组中的结构变异[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1245-1254 [Li RM, Liu TP, He JH, Dong KJ, Zhang L, Li YW, Yang TY. Structural variation of the CPP gene family in broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.) pan-genomes [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1245-1254]
- 68 刘承琦, 宋明丹, 塔林葛娃, 李月梅, 王鸿霞, 王乾冰. 青海省农业源非CO₂温室气体排放特征及减排策略[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1255-1262 [Liu CQ, Song MD, Talin Gewa, Li YM, Wang HX, Wang QB. Characteristics of total non-CO₂ greenhouse gas emissions from agricultural sources and emission reduction strategies in Qinghai Province, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1255-1262]
- 69 李旗, 陈云江, 扎西罗布, 甘雅文, 庄达彬, 姚新华, 唐天文, 孙晓铭, 潘开文, 张林. 1988-2018年青藏高原农田生态系统碳足迹时空变化及影响因素[J]. 应用与环境生物学报, 2024, **30** (6): 1263-1274 [Li Q, Chen YJ, Zhaxi Luobu, Gan YW, Zhuang DB, Yao XH, Tang TW, Sun XM, Pan KW, Zhang L. Temporal and spatial variations of carbon footprint in the agricultural ecosystems of the Qinghai-Xizang Plateau from 1988 to 2018 and their influencing factors [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, **30** (6): 1263-1274]
- 70 朴世龙, 何悦, 王旭辉, 陈发虎. 中国陆地生态系统碳汇估算: 方法、进展、展望[J]. 中国科学地球科学, 2022, **52** (6): 1010-1020 [Piao SL, He Y, Wang XH, Chen FH. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: methods, progress and prospects [J]. *Sci China Earth Sci*, 2022, **65** (4): 641-651]