

$\delta^{15}\text{N}$ 在有机农产品鉴别上的应用前景

马希贤, 高源, 王会, 胡国庆* (土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018)

摘要 有机农业在世界范围内正呈现快速发展的趋势, 有机产品识别受到人们的普遍关注。目前已有研究者提出将产品 ^{15}N 自然丰度($\delta^{15}\text{N}$ 值)作为其鉴别指标。介绍了稳定性氮同位素的相关知识, 解释了 $\delta^{15}\text{N}$ 识别技术判断有机生产中肥料施用类型的可行性, 并指出可能引起该技术鉴别误差的主要影响因素。建议在尽可能全面分析各个影响因素的基础上, 结合 $\delta^{15}\text{N}$ 识别技术与其他认证管理措施, 提高有机农产品鉴别的准确度。

关键词 $\delta^{15}\text{N}$; 有机产品鉴别; 稳定性同位素; 氮素

中图分类号 F203 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)02-0015-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.02.005



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

The Application Prospect of $\delta^{15}\text{N}$ in the Identification of Organic Agricultural Products

MA Xi-xian, GAO Yuan, WANG Hui et al (National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018)

Abstract Organic agriculture is showing a trend of rapid development worldwide, and the identification of organic products has attracted widespread attention. At present, researchers have proposed to use the natural abundance of the product ^{15}N ($\delta^{15}\text{N}$ value) as its identification index. Introduces the knowledge of stable nitrogen isotopes, explains the feasibility of $\delta^{15}\text{N}$ recognition technology for judging the type of fertilizer application in organic production, and points out soil conditions, atmospheric nitrogen deposition, irrigation, land use methods, crop types and growth periods, etc. Factors that may cause errors to the technology. Suggests that on the basis of a comprehensive analysis of the influencing factors as far as possible, $\delta^{15}\text{N}$ identification technology combined with other certification management measures to improve the accuracy of organic agricultural products identification.

Key words $\delta^{15}\text{N}$; Identification of organic products; Stable isotope; Nitrogen

随着生活水平的不断提高, 人们对环境问题的关注程度不断增强。鉴于常规农业生产需要付出较高的环境代价, 有机农业的高速发展为现代农业带来了可替代的农业生产模式, 且在广泛的土壤类型条件下和多样的气候环境中都较为适宜^[1-2]。瑞士有机农业研究所对全球 186 个国家进行了相关调查, 全球以有机方式管理的农用地已达 7 150 万 hm^2 (截至 2018 年), 2018 年亚洲有机农地面积增加了 54 万 hm^2 , 增长率 8.9%。国务院发布的《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》强调: 加强绿色食品、有机农产品认证和管理^[3]。近年来, 全球有机产业发展持续向好, 中国有机产业与市场贸易的发展也再创新高, 在生产销售两头都达到了旺盛的局面。至 2020 年我国有机产品标准发放的证书数量相比 2018 年增加了 12.2%; 2019 年我国有机作物生产面积为 232.8 万 hm^2 , 位列全球第 3 位; 我国有机产品总贸易额达到 678.21 亿元, 位列全球第 4 位^[4], 且发展方向仍符合国家供给侧结构性改革的需求。

卢瑜等^[5]研究表明, 有机农业可以倾向于向生态环境良好的偏远地区发展, 加之政策倾斜更可使有机农业为经济欠发达地区提供产业开发方向。从世界有机产业的角度看, 有机产品生产和销售的源头都来自有机农产品, 只有保证了有机农业的持续健康发展才能引导我国的有机产业向利好态势发展。然而, 至 2018 年中国经过有机产品认证的商品销

售比例仅为 37.9%, 可见, 我国有机生产企业生产成本较高却难以达到较高的收益, 从而造成“价高利低”的窘境。造成该局面的根源在于有机农产品生产过程乱象频生, 消费者认为有机农产品的可信度较低, 且对认证标识存疑^[6]。“食源性风险”一词常与有机农产品相关联, 有机农产品在生产过程中任何一个环节的不合格都可能导致其带有潜在的食源性风险, 这就需要一整套合理的溯源和监管体系^[7], 尤其是在有机肥是否使用和污染物流入的检验问题上, Ramakrishnan 等^[8]就发出“有机农业是否真的可以确保生产无污染农产品和食品安全”的疑问, 并指出有机污染物、重金属和多氟烷基物质等持久性污染物正在进入有机产品的生产链条中且危害人体安全。由于有机农产品所带来的巨大经济效益, 部分生产者生产过程中违规使用化学农药或肥料, 消费者日益担心市场上贴有有机食品标签的农产品是否真的只施用了有机肥^[1]。因此, 应着力去构建溯源体系, 这既有利于减少食源性疾病的发生, 又有利于建立起消费者对有机农产品的信任。

氮有 7 种同位素, 多数为放射性同位素, 并且半衰期非常短, 相比之下 ^{14}N 和 ^{15}N 则是较为稳定的同位素。在大气中, ^{14}N 和 ^{15}N 丰度差别非常大, 分别为 99.633% 和 0.365%, ^{14}N 与 ^{15}N 的比值为一个恒定的值, 即 1/272^[9]。常以相对于大气氮(N_2)的千分偏差来表示含氮物质的 N 同位素组成: $\delta^{15}\text{N}(\text{‰, air}) = [(^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{样品}} / (^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{N}_2} - 1] \times 1000$ 。陆地生态系统中, 自然状态下大多数物质(含 N)的 $\delta^{15}\text{N}$ 值处在 $-10\text{‰} \sim +20\text{‰}$ 范围内^[10]。有资料显示^[11-12], 施用不同类型的肥料种植的作物其 $\delta^{15}\text{N}$ 值会有差异: 畜禽粪便、秸秆等来源的有机肥 $\delta^{15}\text{N}$ 值则偏正, 其中畜禽粪便有机肥平均值

基金项目 山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010721); 山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019ZZ021)。

作者简介 马希贤(1997—), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 研究方向: 土壤碳氮循环。* 通信作者, 副教授, 博士, 从事土壤碳氮循环及其环境效应研究。

收稿日期 2021-05-25; **修回日期** 2021-06-02

在+20左右;而化学氮肥的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与大气相接近,一般在-2~+2浮动。基于 $\delta^{15}\text{N}$ 的这种差异,可以为有机产品的鉴别提供一种新的途径。但是一些研究表明,随着土壤不同施肥量、土壤条件、肥料含氮水平、大气氮沉降量、作物类型和生长时期等因素都会引起作物 $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化,所以仅仅凭借 $\delta^{15}\text{N}$ 值进行鉴别会有较大的误差^[13-14]。因此,笔者综述了 $\delta^{15}\text{N}$ 在有机农产品鉴别上的可行性和局限性,并展望了应用 $\delta^{15}\text{N}$ 识别技术需要注意的问题,以期对相关研究提供借鉴。

1 $\delta^{15}\text{N}$ 在有机农产品鉴别上的可行性

氮同位素因其自然分馏效应,目前已在多项研究中被用于判定和鉴别生态系统中的物质来源。例如,在农田中, $\delta^{15}\text{N}$ 技术可用于区分使用无 ^{15}N 标记的化肥种植的常规农产品与 ^{15}N 标记的有机氮肥种植的有机农产品^[15]。Verenitch等^[16]在详查北美西部不同地区土壤和灌溉用水对氮同位素的影响条件下,发现以氮稳定同位素方法区分常规作物和有机作物的方法可以用作验证超过25种不同类型的有机和常规种植绿色农产品。彭凯秀等^[17]利用 ^{13}C 和 ^{15}N 的比值研究了三疣梭子蟹的产地变化情况,产地的差异主要来自不同地区食物造成的差别,同时 ^{15}N 还因生物级、陆源污染、食性和环境的变动而变动,并且3个产地的 $\delta^{15}\text{N}$ 值有着较大的分异性,所以可以据此判别螃蟹的产地。吕军等^[18]利用碳、氮等同位素对山东、内蒙古自治区和山西的牛肉进行了产地追溯,发现内蒙古的牛肉 $\delta^{15}\text{N}$ 值最高,山西最低(为2.26%),表明不同地区间因为生产模式、饲料、土壤和环境等条件而导致了较大的标准差差异,地区内部差异较小。孙淑敏等^[19]通过碳和氮同位素对羊肉组织产地进行溯源的研究中发现,羊组织对 ^{15}N 有富集作用,农业生产方式、饮食营养水平对羊组织内氮同位素组成产生着较大的影响,例如由于农区饲料施化肥,而牧区施有机肥,故农区羊组织 $\delta^{15}\text{N}$ 值显著低于牧区羊组织 $\delta^{15}\text{N}$ 值,以此判别羊肉产地与品质。蔡德陵等^[20]在对无定河流域的有机质溯源的研究中指出,通过稳定性碳、氮同位素可对植物、悬浮体和沉积物的有机质的物源进行判别,从而得出有机质来源,即浮游物质和侵蚀物质。王红云等^[21]通过测定不同品种大枣和大枣的各个部分的 $\delta^{15}\text{N}$ 值,确立了大枣中氮同位素的变化规律以及品种、产地等因素对其值的影响,以期建立起农产品安全溯源库。

然而,Evans等^[22]研究表明,施用硝态氮肥和铵态氮肥对土豆 $\delta^{15}\text{N}$ 值的影响不大,这与冯海强^[23]等利用 ^{15}N 自然丰度法测得有机茶叶的结果类似,尽管有差异,却不像临近蔬菜地一样明显。赵超超等^[24]利用有机肥比化学合成肥料拥有更高的 $\delta^{15}\text{N}$ 正值的规律,分析了超市“有机蔬菜”和“普通蔬菜”的 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值差异,发现在抽检的5种蔬菜中,有机农产品标识可信度为60%。Bateman等^[14]也在有机作物和传统作物的氮素组成研究中发现有机胡萝卜的 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值与传统种植的 $\delta^{15}\text{N}$ 的平均值无显著差异,但对于有机种植的番茄和生菜而言,其 $\delta^{15}\text{N}$ 的平均值均是有机种植显著大于传统种植,表明番茄和生菜会由于生产方法而导致氮的同

位素组成是存在系统性差异的。Choi等^[1]对施用化肥和堆肥2种肥料类型条件下的土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值(硝态氮和铵态氮)进行了研究,发现施入有机堆肥会使土壤硝态氮的 $\delta^{15}\text{N}$ 值偏正,且偏正程度与施肥量呈正相关关系。Lim等^[25]用定量的尿素和液态猪粪处理菊花和大白菜,与尿素和不施肥处理相比,液态猪粪可以使菊花和大白菜的植株 $\delta^{15}\text{N}$ 值显著增加;同时也证明了固态肥料与液态肥料在运用 ^{15}N 自然丰度法进行识别时,后者明显更为可靠。Bateman等^[26]的研究发现,化肥种植的作物通常要比有机肥种植的作物同位素组成要“轻”得多,比如胡萝卜在化学合成的氮肥种植下就要比在颗粒鸡粪的有机肥种植下的同位素组成“轻”;并且在泥炭堆肥与混合树皮堆肥的对比下也是如此。Rogers^[27]对来自新西兰市面现有的9种有机蔬菜和传统种植蔬菜进行了同位素研究,发现氮同位素是识别生长较快的有机蔬菜(收获的成熟时间<80 d)的绝佳方法,因为这些蔬菜比传统种植的蔬菜和天然土壤的 ^{15}N 含量明显更高,该研究的主要目的是评估稳定氮同位素作为区分筛选工具的适用性,以检测不符合要求的有机耕作方法和有机产品的虚假标签。这些研究为利用 $\delta^{15}\text{N}$ 值鉴别有机农产品提供了理论上的可能性。

Rogers^[27]曾提出可通过大气氮氧化合而成的硝酸盐之间的同位素差异来区分合成肥料和有机肥料,稳定性氮同位素可通过此原理被应用于区分蔬菜所施肥料是否使用了有机肥,一般情况下施用有机肥种植的蔬菜 $\delta^{15}\text{N}$ 值在5.0‰以上,而施用合成肥料种植的蔬菜 $\delta^{15}\text{N}$ 值在3.5‰以下。Bateman等^[14]在2007年以莴苣、番茄和胡萝卜为研究对象,利用稳定性同位素识别技术对3者的有机产品身份进行了判别,发现此技术在莴苣和番茄的有机身份识别上拥有相当高的准确性,而胡萝卜却相对较低,表明 ^{15}N 的自然丰度值能够作为部分种类有机农产品的判断指标。刘星等^[28]基于Rogers教授的研究对上海市的蔬菜进行了采集,按照其 $\delta^{15}\text{N}$ 值的高低进行比较,除浦东新区低于5‰以外,其他8个区所采集的有机蔬菜均高于5‰,且各区蔬菜 $\delta^{15}\text{N}$ 值低于3‰的平均比例在半数以下,这也侧面验证了上海市蔬菜具有较高的品质。

2 $\delta^{15}\text{N}$ 在有机农产品鉴别上的局限性

2.1 土壤条件对自然丰度($\delta^{15}\text{N}$ 值)的影响

水分条件作为土壤条件之一,其变化会影响土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ 值。Feigin等^[29]在研究土壤硝态氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值时发现,来自美国伊利诺斯州大豆-玉米轮作体系的土壤剖面夏季硝态氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值总是高于10月至次年5月,主要原因是季风气候带来的暖湿气流影响下的土壤水分条件变化与施肥关系大不。Choi等^[1]的研究表明, $\delta^{15}\text{N}$ 值会在短期内随着土壤水分饱和程度的变化而发生明显的变化,土壤水分由不饱和变为饱和时,由于还原作用,铵态氮浓度升高, $\delta^{15}\text{N}$ 值升高;当水分减少变为不饱和时则正好相反。Swap等^[30]在非洲的研究表明,现代土壤会因干旱的水分稀缺而使得有机氮同位素组成发生强烈的变化,例如 C_3 植物会因降水量的变化而导致氮同位素组成发生变化,表现为降雨量每增加100 mm植物氮同位素会随之减少

0.68‰。这与 Aranibar 等^[31]关于作物和土壤 ^{15}N 含量与降雨量呈正相关的结论相符合。Ti 等^[32]在使用 ^{15}N 标记土壤 NH_3 的去向时,发现温度、土壤 pH 值、土壤水分等因素较大的影响着 $^{15}\text{N}-\text{NH}_3$ 自然丰度,虽然可以得出不同氮施用量下 NH_3 挥发全过程中 $\delta^{15}\text{N}$ 值的特征,但利用 ^{15}N 作为示踪剂来量化氮源和氮循环仍有很大的困难。Bedard-Haughn 等^[33]在景观尺度上使用 $\delta^{15}\text{N}$ 来确定给定系统中氮的主要来源和氮循环时发现, $\delta^{15}\text{N}$ 在整个景观中的空间变异通常是非随机的,遵循可预测的空间格局,地形特征控制着各种水文和生物过程的速率,从而导致上下坡度之间的 ^{15}N 明显不同。但是,如果由于固有的背景可变性,根源 $\delta^{15}\text{N}$ 和表层 $\delta^{15}\text{N}$ 之间的差异很小,并且如果分馏过程对要追踪的氮的同位素有很大的影响,则 $\delta^{15}\text{N}$ 将无法用来示踪。

2.2 氮沉降和灌溉对自然丰度($\delta^{15}\text{N}$ 值)的影响 湿沉降和干沉降是主要的大气沉降形式,硝态氮、铵态氮和有机氮是大气沉降氮素的3种主要形态。土壤氮同位素组成随着大气污染、污水灌溉的加剧,田间条件下大气沉降氮素和肥料中氮素的同位素组成的差异会发生变化,并在此基础上影响作物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值。

Pardo 等^[34]测定了具有氮沉降梯度的云杉和阔叶树树叶,结果表明:在1999年,叶 $\delta^{15}\text{N}$ 值与氮沉降量成正比,自 -5.2‰ 升至 -0.7‰ (缅因州至纽约);叶 ^{15}N 自然丰度值与氮沉降量的变化呈现出一致性,且随着净硝化能力的升高而升高,随着土壤C/N的升高而降低。张颖等^[35-36]对于华北平原大气氮沉降进行了4年的研究,发现北京点和另外两个偏远观测点降雨中硝态氮 $\delta^{15}\text{N}$ 值分别为 $(4.23 \pm 4.34\text{‰})$ 、 $(1.19 \pm 3.74\text{‰})$,而铵态氮则分别为 $(0.45 \pm 4.39\text{‰})$ 、 $(-2.8 \pm 4.06\text{‰})$,大气氮湿沉降存在时间和空间上的变异。周晓丽^[37]通过测定细叶小羽藓体内氮浓度及 $\delta^{15}\text{N}$ 值来评估盐城市大气氮沉降的状况, $\delta^{15}\text{N}$ 值为 $-7.76\text{‰} \sim +1.28\text{‰}$,表面大气氮沉降主要来自农业活动,如有机肥料和无机肥料的施用及城市粪污的排放所产生的 NH_3 。赵紫涵^[38]的研究显示,氮素沉降进入土壤后会被羊草吸收利用,3年累积 ^{15}N 吸收率达 $38.36\% \sim 44.89\%$,在各器官中叶的 ^{15}N 吸收率最高,达到 $14.58\% \sim 23.66\%$,其次是地下部分和茎,氮素沉降可在一定程度上对因降雨量减少而导致的生物量降低产生补偿。Bateman 等^[26]指出 ^{15}N 示踪技术对有机产品的识别存在一定的误差, $\delta^{15}\text{N}$ 值除了受到施肥量、肥料种类等因素的影响,同时还会被灌溉水中的硝酸盐的影响。山楠等^[39]设置10个施氮水平,应用 ^{15}N 标记技术在温室下模拟研究分析了潮土玉米氮素利用特征,发现土体中的 ^{15}N 残留率和损失率均随施氮量的增加而增加,表明肥料施用量会显著影响 $\delta^{15}\text{N}$ 值,在长时间的化肥施用和污水灌溉条件下会使土壤中的 ^{15}N 自然丰度值发生改变。

2.3 作物生长时期和种类对 ^{15}N 自然丰度($\delta^{15}\text{N}$ 值)的影响

不同生长时期和品种类型的作物吸收、利用氮素的数量和形态存在很大差异。Choi 等^[40]研究温室下玉米 ^{15}N 值的时间变化,发现化肥与堆肥处理的猪粪施入后,玉米的 ^{15}N 值呈

现出随时间延长而差异减小的趋势。即在生长早期,4个处理间差异显著,生长至30d时,4个处理玉米 $\delta^{15}\text{N}$ 值依次为: $+6.6\text{‰}$ 、 $+1.1\text{‰}$ 、 $+7.7\text{‰}$ 、 $+4.5\text{‰}$,随后差异逐渐减小。该研究表明,在采用 $\delta^{15}\text{N}$ 技术识别有机产品时,鉴别误差可能来自作物生长期的差异。郭佩^[41]在不同花生品种根系 ^{15}N 积累量情况的研究中发现,农花5号品种 ^{15}N 积累量随施氮量的增加呈现先增长后降低的趋势,且显著高于其他品种;湘花11号根部 ^{15}N 积累量偏低,呈单峰曲线变化。因此,作物种类也会影响着 $\delta^{15}\text{N}$ 识别技术的准确性。

3 展望

有机农业的发展呈现出欣欣向荣的态势,人们对于有机产品的需求也日益旺盛,所以对于有机农产品鉴别技术的需求也随之上升,通过 $\delta^{15}\text{N}$ 丰度来甄别农产品在种植过程中是否施用化学合成肥料能够成为一种有效的手段,但目前还处于探索阶段。 $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化受制于多种原因,单纯采用 $\delta^{15}\text{N}$ 值来追溯有机肥的施用无法完全确定有机农产品的真伪,可凭借 ^{15}N 质量守恒定律,建立起有机产品多因素分析数据库,分类别进行有效评价,同时还应建立预测模型和共享网络,为有机鉴别工作提供数据和技术支持。国家机关也应加快完善认证管理政策和措施,建立更加严格的监控体系。

参考文献

- [1] CHOI W J, RO H M, LEE S M. Natural ^{15}N abundances of inorganic nitrogen in soil treated with fertilizer and compost under changing soil moisture regimes[J]. *Soil biology & biochemistry*, 2003, 35(10): 1289-1298.
- [2] HERENCIA J F, RUIZ J C, MELEIRO S, et al. A short-term comparison of organic v. conventional agriculture in a silty loam soil using two organic amendments[J]. *Journal of agricultural science*, 2008, 146(6): 677-687.
- [3] 国务院发文:加强绿色食品、有机农产品认证[J]. *上海质量*, 2021(3): 50.
- [4] 国家市场监督管理总局, 中国农业大学. 中国有机产业与有机产品认证发展(2019)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2020.
- [5] 卢瑜, 向平安, 余亮. 中国有机农业的集聚与空间依赖性[J]. *中国生态农业学报*, 2021, 29(3): 440-452.
- [6] 张秀红, 夏兆刚. 中国有机农业及有机产业发展现状前景与对策[J]. *中国食物与营养*, 2021, 27(9): 34-38.
- [7] 黎茵. 有机农产品的食源性风险与可追溯体系[J]. *北京交通大学学报(社会科学版)*, 2017, 16(4): 46-53.
- [8] RAMAKRISHNAN B, MADDELA N R, VENKATESWARLU K, et al. Organic farming: Does it contribute to contaminant-free produce and ensure food safety? [J/OL]. *Science of the total environment*, 2021, 769[2021-01-07]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145079>.
- [9] FREYER H D. Seasonal variation of $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ratios in atmospheric nitrate species[J]. *Tellus B*, 1991, 43(1): 30-44.
- [10] PETERSON B J, FRY B. Stable isotopes in ecosystem studies[J]. *Annual review of ecology and systematics*, 1987, 18(1): 293-320.
- [11] BEDARD-HAUGHN A, VAN GROENIGEN J W, VAN KESSEL C. Tracing ^{15}N through landscapes: Potential uses and precautions[J]. *Journal of hydrology*, 2003, 272(1/2/3/4): 175-190.
- [12] VITÓRIA L, OTERO N, SOLER A, et al. Fertilizer characterization: Isotopic data (N , S , O , C , and Sr) [J]. *Environmental science and technology*, 2004, 38(12): 3254-3262.
- [13] 袁玉伟, 张志恒, 杨桂玲, 等. 氮稳定同位素的印迹规律与有机食品鉴别[J]. *核农学报*, 2009, 23(4): 659-663.
- [14] BATEMAN A S, KELLY S D, WOOLFE M. Nitrogen isotope composition of organically and conventionally grown crops[J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2007, 55(7): 2664-2670.
- [15] INÁCIO C T, URQUIAGA S, CHALK P M, et al. Identifying N fertilizer regime and vegetable production system in tropical Brazil using ^{15}N natural abundance[J]. *Journal of the science of food and agriculture*, 2015, 95(15): 3025-3032.
- [16] VERENITCH S, MAZUMDER A. Isotopic characterization as a screening

- tool in authentication of organic produce commercially available in western North America [J]. *Isotopes in environmental and health studies*, 2015, 51(2):332-343.
- [17] 彭凯秀, 崔艳梅, 姜芳, 等. 不同产地三疣梭子蟹的稳定同位素比值特征及原产地溯源[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(6):2021-2027.
- [18] 吕军, 王东华, 杨曙明, 等. 利用稳定同位素进行牛肉产地溯源的研究[J]. *农产品质量与安全*, 2015(3):32-36.
- [19] 孙淑敏, 郭波莉, 魏益民, 等. 羊组织中碳、氮同位素组成及地域来源分析[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(8):1670-1676.
- [20] 蔡德陵, 李红燕, 周卫建, 等. 无定河流域碳氮稳定同位素研究[J]. *地球化学*, 2004, 33(6):619-626.
- [21] 王红云, 高占锋, 付才, 等. 大枣不同组织氮稳定同位素变化规律研究[J]. *华北农学报*, 2015, 30(S1):429-434.
- [22] EVANS R D, BLOOM A J, SUKRAPANNA S S, et al. Nitrogen isotope composition of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. T-5) grown under ammonium or nitrate nutrition [J]. *Plant, cell and environment*, 1996, 19(11):1317-1323.
- [23] 冯海强, 潘志强, 于翠平, 等. 利用¹⁵N 自然丰度法鉴别有机茶的可行性分析[J]. *核农学报*, 2011, 25(2):308-312.
- [24] 赵超超, 罗绪强, 袁忠秀, 等. 利用氮稳定同位素指纹技术验证市售有机食品真伪[J]. *贵阳学院学报(自然科学版)*, 2019, 14(4):97-102.
- [25] LIM S S, CHOI W J, KWAK J H, et al. Nitrogen and carbon isotope responses of Chinese cabbage and chrysanthemum to the application of liquid pig manure [J]. *Plant soil*, 2007, 295(1/2):67-77.
- [26] BATEMAN A S, KELLY S D, JICKELLS T D. Nitrogen isotope relationships between crops and fertilizer: Implications for using nitrogen isotope analysis as an indicator of agricultural regime [J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2005, 53(14):5760-5765.
- [27] ROGERS K M. Nitrogen isotopes as a screening tool to determine the growing regimen of some organic and nonorganic supermarket produce from New Zealand [J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2008, 56(11):4078-4083.
- [28] 刘星, 钱群丽, 姚春霞, 等. 基于稳定同位素的上海地产蔬菜种植模式及产地判别[J]. *核农学报*, 2020, 34(S1):1-10.
- [29] FEIGIN A, SHEARER G, KOHL D H, et al. The amount and nitrogen-15 content of nitrate in soil profiles from two central Illinois fields in a corn-soybean rotation [J]. *Soil science society of America*, 1974, 38(3):465-471.
- [30] SWAP R J, ARANIBAR J N, DOWTY P R, et al. Natural abundance of ¹³C and ¹⁵N in C₃ and C₄ vegetation of southern Africa: Patterns and implications [J]. *Global change biology*, 2004, 10(3):350-358.
- [31] ARANIBAR J N, OTTER L, MACKO S A, et al. Nitrogen cycling in the soil-plant system along a precipitation gradient in the Kalahari sands [J]. *Global change biology*, 2004, 10(3):359-373.
- [32] TI C P, MA S T, PENG L Y, et al. Changes of $\delta^{15}\text{N}$ values during the volatilization process after applying urea on soil [J/OL]. *Environmental pollution*, 2021, 270 [2021-01-07]. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116204>.
- [33] BEDARD-HAUGHN A, VAN GROENIGEN J W, VAN KESSEL C. Tracing ¹⁵N through landscapes: Potential uses and precautions [J]. *Journal of hydrology*, 2003, 272(1/2/3/4):175-190.
- [34] PARDO L H, MCNULTY S G, BOGGS J L, et al. Regional patterns in foliar ¹⁵N across a gradient of nitrogen deposition in the northeastern US [J]. *Environmental pollution*, 2007, 149(3):293-302.
- [35] 张颖, 刘学军, 张福锁, 等. 华北平原大气氮素沉降的时空变异[J]. *生态学报*, 2006, 26(6):1633-1639.
- [36] ZHANG Y, LIU X J, FANGMEIER A, et al. Nitrogen inputs and isotopes in precipitation in the North China Plain [J]. *Atmospheric environment*, 2008, 42(7):1436-1448.
- [37] 周晓丽. 利用细叶小羽藓监测大气重金属及氮沉降的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2019:61.
- [38] 赵紫涵. 降雨量减少和氮沉降对羊草生物量及草地氮素分配的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2020:38-39.
- [39] 山楠, 杜连凤, 毕晓庆, 等. 用¹⁵N 肥料标记法研究潮土中玉米氮肥的利用率与去向[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(4):930-936.
- [40] CHOI W J, LEE S M, RO H M, et al. Natural ¹⁵N abundances of maize and soil amended with urea and composted pig manure [J]. *Plant and soil*, 2002, 245:223-232.
- [41] 郭佩. 施氮量对不同花生品种生长发育及不同氮源供氮特性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2021.
- [42] 2020.114050.
- [45] YANG E L, LI D, YIN P K, et al. A novel surface-enhanced Raman scattering (SERS) strategy for ultrasensitive detection of bacteria based on three-dimensional (3D) DNA walker [J/OL]. *Biosensors and bioelectronics*, 2021, 172 [2021-01-17]. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112758>.
- [46] WANG S Y, ZHENG L Y, CAI G Z, et al. A microfluidic biosensor for online and sensitive detection of *Salmonella typhimurium* using fluorescence labeling and smartphone video processing [J/OL]. *Biosensors & bioelectronics*, 2019, 140 [2021-01-17]. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.111333>.
- [47] WANG S Y, LIU N, ZHENG L Y, et al. A lab-on-chip device for sample-in-result-out detection of viable *Salmonella* using loop-mediated isothermal amplification and real-time turbidity monitoring [J]. *Lab on a chip*, 2020, 20:2296-2305.
- [48] WANG Q, CHENG X C, LI H H, et al. A novel DNA quantum dots/apptamer-modified gold nanoparticles probe for detection of *Salmonella typhimurium* by fluorescent immunoassay [J/OL]. *Materials today communications*, 2020, 25 [2021-01-17]. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101428>.
- [49] HU J, TANG F, JIANG Y Z, et al. Rapid screening and quantitative detection of *Salmonella* using a quantum dot nanobead-based biosensor [J]. *The analyst*, 2020, 145(6):2184-2190.

(上接第8页)

- [37] 许俊钢. 基因芯片快速检验细菌的临床应用[J]. *中国实用医药*, 2016, 11(1):33-34.
- [38] 祝儒刚, 李拖平, 宋立峰. 应用基因芯片技术检测肉及肉制品中5种致病菌[J]. *食品科学*, 2012, 33(14):211-215.
- [39] SARENGAOWA, HU W Z, FENG K, et al. An *in situ*-synthesized gene chip for the detection of food-borne pathogens on fresh-cut cantaloupe and lettuce [J]. *Frontiers in microbiology*, 2019, 10:1-11.
- [40] 徐连应, 王毕妮, 张富新. 基于复合纳米材料和酶切信号放大电化学适配体传感器检测沙门氏菌[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(21):4186-4195.
- [41] 肖稳, 张海韵, 杨滔, 等. 羧甲基壳聚糖-分子信标-金纳米生物传感器检测鼠伤寒沙门氏菌[J]. *中国食物与营养*, 2019, 25(9):33-36.
- [42] YI J C, WU P, LI G Y, et al. A composite prepared from carboxymethyl chitosan and aptamer-modified gold nanoparticles for the colorimetric determination of *Salmonella typhimurium* [J]. *Microchimica acta*, 2019, 186(11):1-8.
- [43] XU X M, MA X Y, WANG H T, et al. Aptamer based SERS detection of *Salmonella typhimurium* using DNA-assembled gold nanodimers [J]. *Microchimica acta*, 2018, 185(7):1-8.
- [44] LI A, ZUO P, YE B C. An aptamer biosensor based dual signal amplification system for the detection of *Salmonella typhimurium* [J/OL]. *Analytical biochemistry*, 2020, 615 [2021-01-17]. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2020.114050>.