



车怡娇, 吕治兵, 汪敏, 李进荣, 王彦军, 张玉娇, 李健强. 洱海流域小农户模式下施用不同品牌鸡粪肥对鲜食玉米农艺性状及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2026,31(04):44-58.

CHE Yijiao, LYU Zhibing, WANG Min, LI Jinrong, WANG Yanjun, ZHANG Yujiao, LI Jianqiang. Effects of applying different brands chicken manure fertilizers on agronomic traits and yield of fresh-eating corn under the small-holder farming model in the Erhai Lake Basin[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(04): 44-58.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.04.04

洱海流域小农户模式下施用不同品牌鸡粪肥对鲜食玉米农艺性状及产量的影响

车怡娇¹ 吕治兵² 汪敏³ 李进荣³ 王彦军⁴ 张玉娇¹ 李健强^{5*}

(1. 云南大学 农学院, 昆明 650504;

2. 山西农业大学 农学院, 山西 晋中 030801;

3. 武汉楚强生物科技有限公司, 武汉 430120;

4. 北农(海利)涿州种衣剂有限公司, 河北 涿州 072750;

5. 中国农业大学 植物保护学院, 北京 100193)

摘 要 洱海流域是云南典型的以小农户模式为主的高原湖泊鲜食玉米种植生产基地,为探究不同品牌鸡粪肥作为基肥施用在洱海流域的应用效果及潜在风险,选择洱海流域的主要鲜食玉米品种“农科糯336”、“京紫糯219”、“SBS902”和“天紫23”为供试品种,设置品牌1鸡粪有机肥(T1)、品牌2干鸡粪肥(T2)、品牌3干鸡粪肥(T3)和不施肥(CK)共4个处理,采用裂区试验设计,探究不同品牌鸡粪肥对种子萌发特性、幼苗安全性(烧苗率)、关键农艺性状指标及产量的影响。结果表明:1)浸提液处理结果显示T1处理发芽指数 $>70\%$,符合要求,而T2和T3处理显著抑制种子萌发,发芽率相较于CK降低 $6.8\%\sim 27.6\%$,胚根长缩减 $6.9\%\sim 55.7\%$;田间施用鸡粪肥后,T2和T3处理烧苗率达 $1.3\%\sim 10.7\%$,显著高于T1($\leq 1.1\%$)和CK($\leq 0.6\%$)($P<0.05$),其中,“天紫23”各处理下的烧苗率普遍低于其他品种。2)3种鸡粪肥田间施用均能提高鲜食玉米株高、叶绿素相对含量及干物质总积累量,显著提高鲜食玉米的单穗重和产量($P<0.05$)。其中,T2处理下4个鲜食玉米品种产量均达到最高,平均增产幅度达 $15.2\%\sim 28.3\%$,T1和T3处理下平均增产幅度则为 $5.7\%\sim 19.1\%$ 。综上,洱海流域常用的2个品牌的干鸡粪肥(T2和T3)对鲜食玉米呈现增产潜力与苗期风险并存的双重效应。本研究建议小农户采用“以种定肥”的策略:优先选用腐熟度高的标准化鸡粪有机肥(T1);或者选用干鸡粪肥搭配耐受性强的品种(“天紫23”)以有效规避施用风险。既适配小农户实际生产需求,也为区域种养循环优化与农业面源污染协同治理提供技术支持。

关键词 洱海流域; 鸡粪有机肥; 干鸡粪肥; 鲜食玉米

中图分类号 S513

文章编号 1007-4333(2026)04-0044-15

文献标志码 A

Effects of applying different brands chicken manure fertilizers on agronomic traits and yield of fresh-eating corn under the small-holder farming model in the Erhai Lake Basin

CHE Yijiao¹, LYU Zhibing², WANG Min³, LI Jinrong³, WANG Yanjun⁴,
ZHANG Yujiao¹, LI Jianqiang^{5*}

收稿日期: 2025-07-30; 接受日期: 2025-10-10

基金项目: 云南大学实践项目(ZC-23236705); 北农(海利)涿州种衣剂企业项目(BNHL-EHAGD 2024-001); 云南省新型研发机构培育对象洱海流域农业绿色发展研究院项目(202304BQ040005)

第一作者: 车怡娇(ORCID:0009-0008-1416-7879), 硕士研究生, E-mail: cheyijiao12345@126.com

通讯作者: 李健强(ORCID:0000-0002-1531-7372), 教授, 主要从事种子病理学及种子保健技术研究, E-mail: lijq231@cau.edu.cn

- (1. College of Agriculture, Yunnan University, Kunming 650504, China;
2. College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China;
3. Wuhan Chuqiang Biotechnology Co., Ltd., Wuhan 430120, China;
4. Beinong (Haili) Zhuozhou Seed Coating Agent Co. Ltd., Zhuozhou 072750, China;
5. College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract The Erhai Lake Basin is a typical production base for fresh-eating corn cultivation in a plateau lake area of Yunnan Province, where small-holder farming is the dominant mode. In order to explore the application effect and potential risks of different brands of chicken manure fertilizer applied as basal fertilizer in the Erhai Lake Basin, the main fresh-eating corn varieties ‘Nongkenuo 336’, ‘Jingzino 219’, ‘SBS902’, and ‘Tianzi 23’ in the Erhai Lake Basin were selected as the test varieties. Four treatments were set up: Brand 1 chicken manure organic fertilizer (T1), Brand 2 dried chicken manure fertilizer (T2), Brand 3 dried chicken manure fertilizer (T3) and no fertilizer (CK). The effects of different brands of chicken manure fertilizer on seed germination characteristics, seedling safety (burnt seedling rate), key agronomic traits and yield were investigated by split-plot experimental design. The results showed that: 1) The results of leaching solution treatment showed that the germination index of T1 treatment was more than 70%, which met the requirements, while T2 and T3 treatments significantly inhibited seed germination, the germination rate decreased by 6.8% to 27.6% and was lower than that of CK, and the radicle length decreased by 6.9% to 55.7%; After applying chicken manure fertilizer in the field, the burnt seedling rate of T2 and T3 treatments reached 1.3% to 10.7%, which was significantly higher than that of T1 ($\leq 1.1\%$) and CK ($\leq 0.6\%$) ($P < 0.05$). Among all varieties, ‘Tianzi 23’ exhibited a lower seedling burning rate across all treatments compared to the others. 2) The application of three kinds of chicken manure fertilizers in the field increased the plant height, relative chlorophyll content and total dry matter accumulation of fresh-eating corn, and significantly increased the single ear weight and yield of fresh-eating corn ($P < 0.05$). Among them, the yields of the four fresh-eating corn varieties under T2 treatment were the highest, with an average yield increase of 15.2% to 28.3%, and the average yield increase under T1 and T3 treatments was 5.7% to 19.1%. In summary, the two brands of dried chicken manure fertilizers (T2 and T3) commonly used in the Erhai Lake Basin exhibited a dual effect on fresh-eating corn: high yield potential coexists with seedling-stage risks. This study recommends that small-holder farmers adopt a ‘variety-first’ fertilization strategy: Prioritizing the use of well-rotted, standardized chicken manure organic fertilizer (T1); Alternatively, using dried chicken manure fertilizer in combination with a stress-tolerant variety ‘Tianzi 23’ to effectively mitigate application risks. This would not only adapt to the actual production needs of small-holder farming, but also provide technical support for the optimization of regional planting-breeding cycles and the collaborative governance of agricultural non-point source pollution.

Keywords Erhai Lake Basin; composted chicken manure; air-dried chicken manure; fresh-eating corn

洱海是我国重要的淡水湖泊,洱海流域既是国家重点生态保护区,亦是传统农耕核心产区。为缓解生态压力、治理农业面源污染,流域内实施了多项保护政策,其中包括在流域核心生态区域划定禁养区,全面禁止规模化畜禽养殖。然而,畜禽粪肥是当地农业生产中基肥的重要来源^[1-2],禁养区管控虽有效改善了水质,却打破了传统种养循环体系,促使小农户转向外部非保护区采购畜禽粪肥特别是鸡粪作为基肥,由此催生了区域性的鸡粪肥流通产业链。本研究实地调查显示:流域内流通的鸡粪肥多为经简单脱水或晾晒处理的干鸡粪,存在包装无标识、来源复杂、腐熟不彻底等问题;小农户普遍

采用经验施肥模式,难以规避烧苗、养分供应不稳定等风险,形成典型的“粗放流通—施用”模式,详见图1。在此背景下,亟需明确该模式下鸡粪肥的实际应用效果、潜在风险及优化路径。

鸡粪肥作为传统有机肥源,富含氮、磷、钾及有机质,在改善土壤结构、提升土壤肥力及促进作物生长中具有重要作用^[3-4]。鲜食玉米作为洱海流域小农户主要栽培作物,兼具“蔬、果、粮”多元用途,是当地农民重要的经济来源^[5-6]。已有研究证实,鸡粪肥与化肥配施可提高玉米产量^[7-8],且其作为土壤改良剂能提升土壤速效磷与有机质含量,促进玉米营养生长,并显著提高籽粒产量^[9-10]。然而,现有研

究多聚焦理想条件下的养分配施效应,未关注洱海流域农资产业链中实际流通的干鸡粪肥特性^[11-12],更缺乏对小农户“按经验等量施用不同品牌鸡粪肥”场景下的系统评估,尤其忽视了未腐熟干鸡粪肥的苗期风险(如发芽抑制、烧苗等)及鲜玉米品种耐受性差异^[13-14]。

基于此,本研究拟立足洱海流域小农户生产实际,模拟其“等重量施用”不同品牌鸡粪肥的现行做法,选择“农科糯 336”、“京紫糯 219”、“SBS902”、“天紫 23”共 4 个鲜食玉米品种。该 4 个品种涵盖糯玉米、甜玉米和彩色糯玉米 3 大类型,既包括农户广泛种植的常规品种,也纳入具有推广潜力的特色品种,以期全面评估品种对肥料的耐受性差异。通过室内与田间试验相结合的方式,探究洱海流域流通的 3 种鸡粪肥对鲜食玉米“种子萌发—幼苗生长—产量形成”全过程的农艺效应与应用风险,并进一步探究基于品种耐受性的优化策略,以期为当地农户筛选低风险鸡粪肥产品提供依据,为高原湖泊流域“种养循环与污染控制”协同治理提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2024 年 3—6 月进行洱海流域鸡粪肥应用和农户技术需求现状田间调研。调研发现洱海流域小农户鸡粪肥使用存在明显的“粗放流通—施用”特征,详见图 1,具体表现为:一是储存粗放,多临时堆置于田间,缺乏规范储存条件;二是包装无标识,产品包装袋无品牌、成分等信息,难以判断鸡粪肥腐熟度及来源;三是施用方式随意,基肥施用无统一标准;四是用量凭经验,农户普遍以“袋”计量(约 20 kg/袋),鲜食玉米种植中施用量达 450 袋/hm²。于 2024 年 7 月—2025 年 1 月在云南省大理市湾桥镇南庄村试验基地(25°48' N, 100°07' E, 海拔 1 984 m)进行田间试验。试验区干湿季分明,平均气温为 14.6 °C,年平均降水量 1 048 mm^[5,15]。鲜食玉米采用双行垄作模式,种植密度为 67 500 株/hm²。采用育苗移栽技术,2024 年 7 月 4 日育苗,7 月 15 日移栽,移栽后田间有烧苗现象,对缺苗处进行了补苗处理。9 月 24 日—10 月 5 日分品种采收。



(a) Temporary stacking of chicken manure in the field



(b) Unmarked chicken manure packaging bags



(c) Chicken manure as base fertilizer application



(d) Chicken manure is used in bags

图 1 洱海流域鸡粪肥田间使用情况

Fig. 1 Field application of chicken manure in Erhai Lake Basin

2024 年 11 月—2025 年 1 月完成种子发芽试验。试验地前茬作物为马铃薯,耕层 0—20 cm 的土壤有机质含量为 74.3 g/kg,全氮含量 5.1 g/kg,有效磷含量 66.0 mg/kg,速效钾含量 81.2 mg/kg,pH 5.01。

1.2 试验材料

根据种植区域特征将 4 个供试鲜食玉米品种划分为 2 类:“农科糯 336”和“京紫糯 219”为云南省外

引进的主栽品种,由北京农林科学院玉米所王荣焕研究员提供;“SBS902”和“天紫 23”为云南省内主栽品种,采购于大理市湾桥镇当地农资店。

供试鸡粪肥:鸡粪肥的品牌来源、肥料品名、营养成分、理化性质等信息详见表 1。T1 为经过标准化生产的有机肥,干鸡粪肥为仅经风干和晾晒处理的“初级”鸡粪肥产品。

表 1 不同品牌/来源的鸡粪肥基本信息
Table 1 Basic information of chicken manure from different brands/sources

品牌号(处理) Brand no. (Treatment)	来源 Source	肥料品名 Fertilizer product name	ω(含水率)/% Moisture content
1(T1)	大理华垦肥业有限公司	有机肥	23.29
2(T2)	大理州祥云县沙龙镇青海营村	干鸡粪肥	12.45
3(T3)	大理市湾桥镇南庄村 (溯源为四川凉山)	干鸡粪肥	17.45

ω(全氮)/% Total nitrogen	ω(全磷)/% Total phosphorus	ω(全钾)/% Total potassium	ω(有机质)/% Organic matter	pH
2.12	2.31	4.05	25.5	8.86
4.36	1.32	2.89	34.5	7.79
5.15	1.24	2.69	45.1	7.60

注:表中含水量的质量分数基于原始湿样品的总质量计算。
Note: The mass fraction of water content in the table is calculated based on the total mass of the original wet sample.

1.3 试验设计

1.3.1 不同鸡粪肥浸提液对鲜食玉米种子萌发特性的影响

共设置 3 个试验处理组:T1、T2、T3 的鸡粪肥浸提液,浸提液固液质量比为 1:10,参照 NY/T 525—2021《有机肥料》^[16]标准制备,以去离子水为空白对照(CK)。将鲜食玉米种子置于铺有发芽纸的发芽盒(长×宽×高为 19 cm×13 cm×12 cm)中,每盒均匀摆放 50 粒种子,分次定量加入 30 mL 对应处理液,每个处理 3 次重复^[17-18]。

1.3.2 不同鸡粪肥对鲜食玉米生长和产量的影响

试验采用裂区设计:主区处理为施用不同品牌(T1、T2、T3)的鸡粪肥试验处理及不施肥对照处理(CK);副区处理为 4 个鲜食玉米品种。试验采用随机区组排列,设置 3 次重复,主区面积 96 m²,副区面积 24 m²。鸡粪肥做基肥施用,施用量为 9.0 t/hm²,生育期内拔节期和大喇叭口期各追肥 1 次,共施尿素 300 kg/hm²,对照组不施用肥料^[19]。各处理组养分投入情况详见表 2。

表 2 不同处理组养分投入情况

Table 2 Nutrient input in different treatment groups
kg/hm²

处理 Treatment	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium
T1	336	213	365
T2	495	122	261
T3	602	112	263
CK	0	0	0

1.4 测定项目及方法

1.4.1 种子的发芽率、胚根长和发芽指数

将种子置于恒温培养箱中(25±1)℃避光培养 72 h 后统计发芽率,每盒选取生长一致的 5 株幼苗测量其胚根长,计算种子发芽指数(GI)^[17-18]。具体计算公式如下:

发芽率 = $\frac{\text{正常发芽的种子数}}{\text{供试种子总数}} \times 100\%$

$$GI = \frac{\text{鸡粪肥浸提液培养种子发芽率} \times \text{鸡粪肥浸提液培养种子平均根长}}{\text{水培养的种子发芽率} \times \text{水培养的种子平均根长}} \times 100\%$$

参考 NY/525—2021《有机肥料》^[16]行业标准,有机肥浸提液处理下发芽指数 $\geq 70\%$,则认为此肥料符合有机肥料相关技术指标要求。

1.4.2 幼苗的烧苗率

鲜食玉米定植后,于幼苗完全缓苗后(定植后第7天),参照张建桃等^[20]的烧苗判断标准,系统调查烧苗发生情况。具体计算公式如下:

$$\text{烧苗率} = \frac{\text{烧苗株数}}{\text{总定植株数}} \times 100\%$$

1.4.3 植株生长指标

每个小区连续选取5株生长一致的鲜食玉米植株,在苗期、拔节期、大喇叭口期、吐丝期、乳熟期5个生育期采用卷尺测量株高,SPAD-502叶绿素仪测定叶片的SPAD值^[22](叶绿素相对含量)。

1.4.4 产量及产量构成要素

于乳熟期,采收1.2 m $\times$ 6.0 m双行(面积为7.2 m²)的鲜果穗测定产量^[23-24]。从中随机选取5个

大小均匀的果穗进行考种,测量果穗的穗长、穗粗和单穗重^[25]。

1.4.5 植株的干物质积累量

各处理于乳熟期分别取5株田间长势均匀一致的鲜食玉米植株,按不同器官进行分样,105℃杀青30 min,75℃烘干至恒重后称量各器官重量^[26]。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据汇总和可视化分析,采用 SPSS 20.0 软件进行统计分析,采用 Duncan 多重比较法进行组间差异显著性检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同鸡粪肥浸提液对鲜食玉米种子发芽率、胚根长、发芽指数的影响

由表3可见:在发芽率方面,T1处理下4个品种均维持与对照(CK)相当的高发芽率,且T1处理下

表3 不同处理下4种鲜食玉米的发芽情况
Table 3 Germination of four kinds of fresh-eating corn under different treatments

品种 Variety	处理 Treatment	发芽率/% Germination rate	胚根长/cm Radicle length	发芽指数/% Germination index
农科糯 336 Nongkenuo 336	T1	89.33 $\pm$ 4.16 a	3.40 $\pm$ 0.34 a	103.89 $\pm$ 14.37 a
	T2	76.00 $\pm$ 2.00 b	2.69 $\pm$ 0.32 b	69.72 $\pm$ 8.31 b
	T3	76.67 $\pm$ 3.06 b	2.11 $\pm$ 0.28 c	55.52 $\pm$ 9.69 b
	CK	92.67 $\pm$ 5.77 a	3.16 $\pm$ 0.14 ab	
京紫糯 219 Jingzinuo 219	T1	89.33 $\pm$ 6.43 a	6.66 $\pm$ 0.69 a	87.73 $\pm$ 9.47 a
	T2	81.33 $\pm$ 1.15 b	4.71 $\pm$ 0.19 b	56.53 $\pm$ 1.62 b
	T3	76.67 $\pm$ 4.16 b	3.21 $\pm$ 0.30 c	36.42 $\pm$ 4.28 c
	CK	93.33 $\pm$ 3.06 a	7.25 $\pm$ 0.06 a	
SBS902	T1	72.00 $\pm$ 5.29 a	2.63 $\pm$ 0.07 a	97.78 $\pm$ 4.49 a
	T2	73.33 $\pm$ 3.06 a	2.28 $\pm$ 0.03 c	86.53 $\pm$ 2.41 b
	T3	72.00 $\pm$ 6.00 a	1.90 $\pm$ 0.12 d	70.96 $\pm$ 7.71 c
	CK	78.71 $\pm$ 6.71 a	2.45 $\pm$ 0.05 b	
天紫 23 Tianzi 23	T1	71.33 $\pm$ 8.08 ab	3.93 $\pm$ 0.57 a	78.72 $\pm$ 3.92 a
	T2	66.67 $\pm$ 8.08 b	2.74 $\pm$ 0.09 b	51.94 $\pm$ 7.13 b
	T3	59.33 $\pm$ 6.11 b	3.28 $\pm$ 0.26 b	55.38 $\pm$ 8.00 b
	CK	82.00 $\pm$ 5.29 a	4.29 $\pm$ 0.13 a	

注:鸡粪肥处理组的发芽指数是相对对照计算得出,故对照处理组无数值。表中同列数据后不同小写字母表示不同处理间在0.05水平下差异显著。下同。
Note: The germination index for the chicken manure treatment is calculated relative to the control, therefore, no value is presented for the control group. Within the same column, values followed by different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the 0.05 level. The same below.

“农科糯 336”和“京紫糯 219”的发芽率显著高于 T2 和 T3($P<0.05$)。相比之下, T2 和 T3 处理则会显著抑制种子发芽($P<0.05$): 与 CK 相比, T2 处理下 4 个品种的发芽率下降 6.8%~18.7%, T3 处理下发芽率则下降 8.5%~27.6%; 胚根长方面, T1 处理下“农科糯 336”和“SBS902”的胚根长较 CK 分别增长 7.6% 和 7.3%, T2 和 T3 处理则显著抑制 4 个品种的胚根生长($P<0.05$)。与 CK 相比, 4 个品种在 T2 和 T3 处理下胚根长分别缩减 6.9%~36.1% 和 33.2%~55.7%, 与 T1 相比则分别缩减 13.3%~30.3% 和 27.8%~51.8%; 发芽指数方面, T1 处理下 4 个品种的发芽指数均超 78%, 显著高于 T2 和 T3($P<0.05$), 且符合有机肥安全标准($\geq 70\%$)。T2 和 T3 处理下发芽指数普遍偏低, 仅“SBS902”达标, 其他品种中“京紫糯 219”的发芽指数降幅最大, 较 T1 分别降低 35.6% 和 58.5%。因此, 标准化有

机肥(T1)处理对种子发芽无显著不利影响, 而 2 种干鸡粪肥(T2 和 T3)则对种子的发芽表现出显著的抑制效应, 且不同品种在不同品牌鸡粪肥处理下的响应存在差异。

2.2 不同鸡粪肥处理下鲜食玉米的烧苗率

由表 4 可见: T1 处理在 4 个品种中烧苗率均低于 1.1%, 且显著低于 T2 与 T3 处理($P<0.05$); T2 处理下烧苗率为 1.3%~10.7%, 其中“SBS902”的烧苗率达 10.7%, 为该处理最高值; T3 处理下烧苗率为 5.0%~9.5%, “京紫糯 219”烧苗率达 9.5%, 为该处理最高; CK 处理下 4 个品种的烧苗率均为最低, 为 0.0%~0.6%; 此外, “天紫 23”在各鸡粪肥处理下的烧苗率普遍低于其他品种, 仅 T3 处理引起其显著烧苗($P<0.05$)。因此, T1 处理对鲜食玉米的烧苗风险最低, T2 与 T3 处理则会引起不同程度的烧苗, 且不同品种存在明显的抗性差异。

表 4 不同处理下 4 种鲜食玉米幼苗的烧苗率

Table 4 Scorching seedling rate of four fresh-eating corn varieties under different treatments %

处理 Treatment	烧苗率 Burn seedling rate			
	农科糯 336 Nongkenuo 336	京紫糯 219 Jingzinuo 219	SBS902	天紫 23 Tianzi 23
T1	1.04±0.03 b	0.53±0.01 c	0.56±0.01 c	0.00±0.00 b
T2	6.57±0.33 a	4.20±0.14 b	10.70±0.54 a	1.25±0.17 b
T3	7.97±0.55 a	9.46±0.21 a	4.95±0.58 b	6.32±0.50 a
CK	0.00±0.00 b	0.00±0.27 c	0.55±0.01 c	0.00±0.00 b

2.3 不同鸡粪肥处理下鲜食玉米的株高和 SPAD 值

2.3.1 不同鸡粪肥处理下鲜食玉米的株高

由图 2 可见: 在鲜食玉米苗期时, “SBS902”和“天紫 23”在 T1 和 T2 处理下的株高显著高于 CK, “农科糯 336”在 T1 处理下的株高显著高于 T2、T3 及 CK($P<0.05$); 进入拔节期, 各处理间鲜食玉米的株高无显著差异; 在大喇叭口期和吐丝期, “农科糯 336”的 T2 处理株高显著高于 T3 和 CK, “京紫糯 219”的 T3 处理株高仅在大喇叭口期显著高于 CK, 而“天紫 23”的 T1 和 T2 处理均显著高于 CK($P<0.05$), 表明大喇叭口期和吐丝期内 T2 处理对株高的提升效果最优; 在乳熟期, “SBS902”和“天紫 23”在 T2 处理下的株高显著高于 T3 和 CK, 而“农科糯

336”在 T2 处理下的株高显著高于 CK($P<0.05$)。因此, 3 种品牌鸡粪肥的施用均能促进鲜食玉米株高的生长, 但不同品牌鸡粪肥处理对株高的促进效果存在差异, 其中 T2 处理在多个生育阶段表现最优。

2.3.2 不同鸡粪肥处理下鲜食玉米的 SPAD 值

由图 3 可见: 在鲜食玉米苗期, 品种“农科糯 336”在 T1 处理下的 SPAD 值显著高于 CK($P<0.05$), 而其他品种在不同处理间的 SPAD 值无显著差异; 在大喇叭口期和吐丝期, SPAD 值普遍达到峰值, “农科糯 336”和“京紫糯 219”在 T2 处理下的 SPAD 值显著高于 T3 和 CK($P<0.05$), “SBS902”在 T1 和 T2 处理下的 SPAD 值也显著高于 CK($P<0.05$); 在乳熟期, “农科糯 336”和“天紫 23”在 T1 处

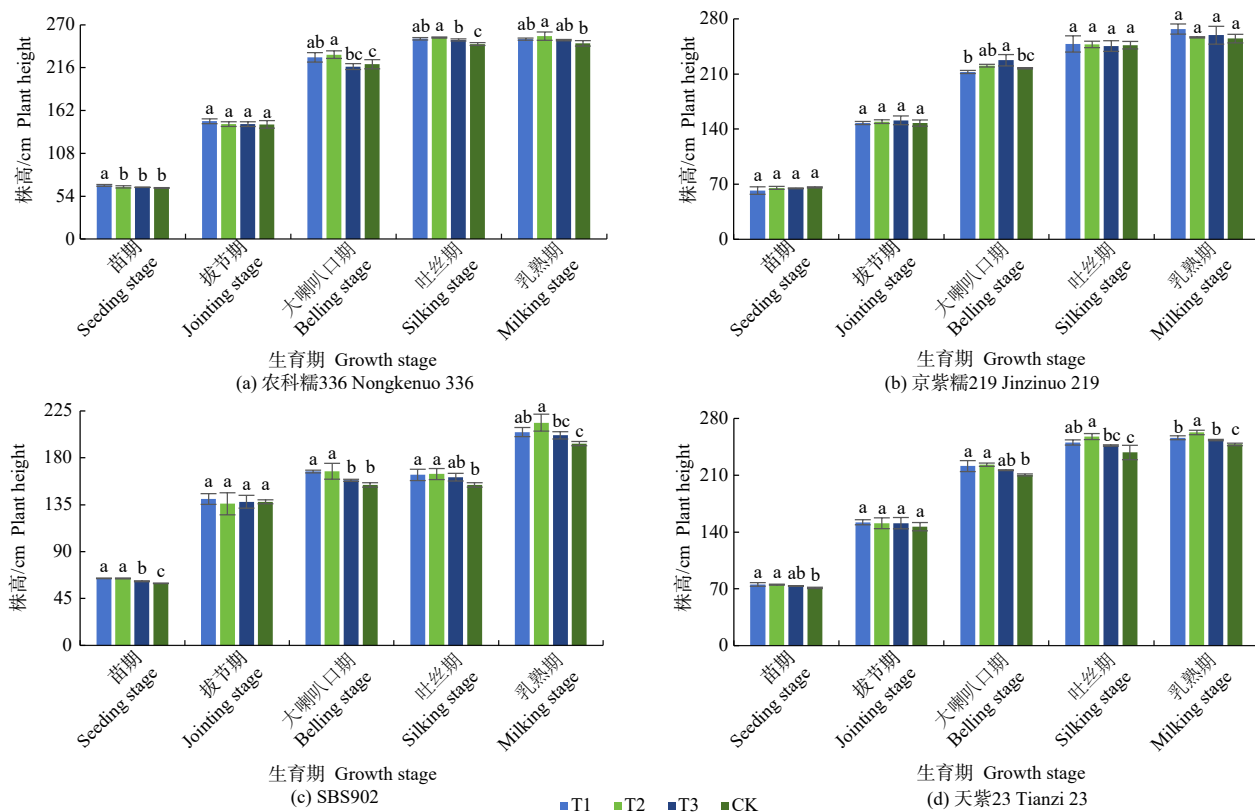


图2 不同处理下4种鲜食玉米的株高

Fig. 2 Plant height of four fresh-eating corn varieties under different treatments

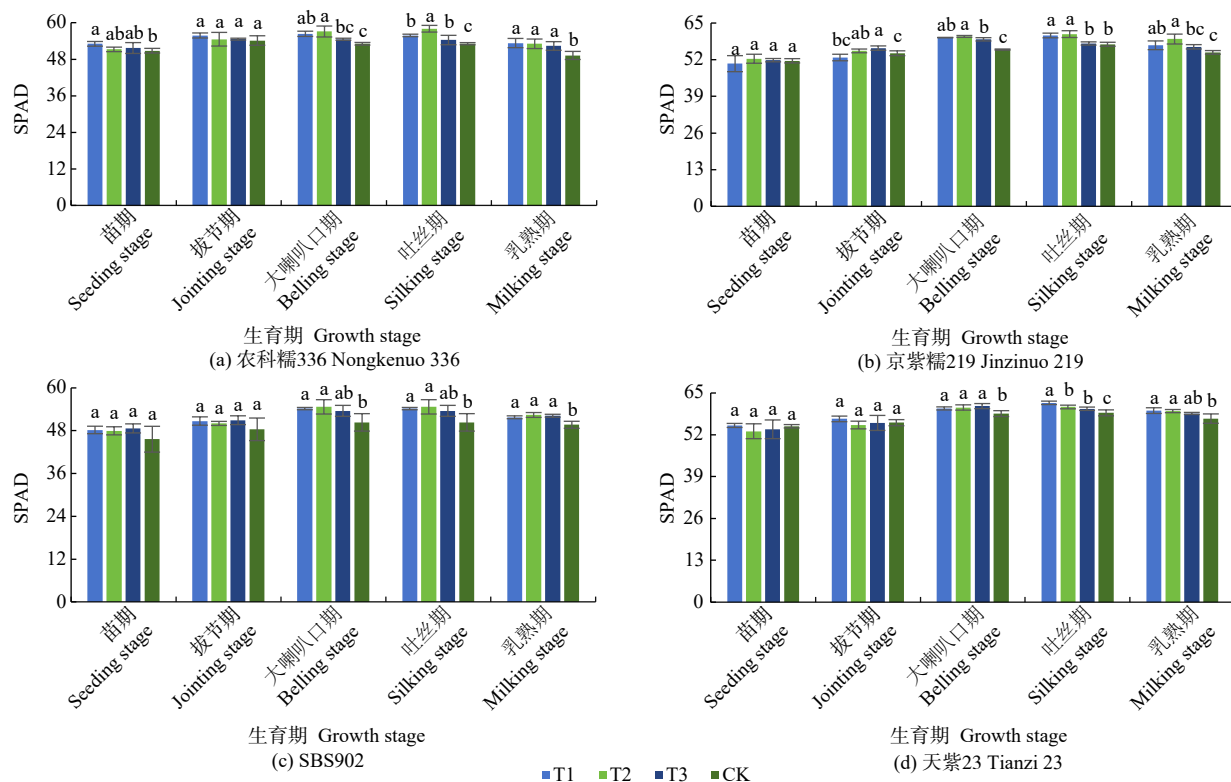


图3 不同处理下4种鲜食玉米的SPAD值

Fig. 3 SPAD of four fresh-eating corn varieties under different treatments.

理下 SPAD 值最高,且显著高于 CK($P<0.05$)。“京紫糯 219”和“SBS902”则在 T2 处理下 SPAD 值最高且显著高于 CK,同时“SBS902”的 T1 和 T3 处理的 SPAD 值也显著高于 CK($P<0.05$)。因此,3 种鸡粪肥的施用均能提高鲜食玉米生长中后期叶片的 SPAD 值,其中 T2 处理的提升效果更稳定。

2.4 不同鸡粪肥处理下鲜食玉米的产量及产量构成要素

由表 5 可见:在产量方面,T1、T2 和 T3 处理下 4 个鲜食玉米品种的产量均显著高于 CK($P<0.05$),整体表现为 $T2>T1>T3>CK$ 。T2 处理下 4 个品种较 CK 增产幅度为 15.2%~28.3%,而 T1 与 T3 处理下的增幅分别为 6.0%~19.1% 和 5.7%~17.0%。与 T1 处理相比,“农科糯 336”、“京紫糯 219”、“SBS902”和“天紫 23”在 T2 处理下

产量分别提升 3.6%、9.0%、7.7% 和 2.9%,与 T3 处理相比产量则分别提升 4.5%、9.3%、16.7% 和 3.3%。这表明 T2 处理的增产效果最优。4 个品种中,“SBS902”增产幅度最大,达 9.9%~28.3%,“SBS902”在 T2 处理下增产幅度最高,达 28.3%,在 T1 和 T3 处理下亦分别达 19.1% 和 9.9%;在产量构成要素方面,“农科糯 336”在 T3 处理下单穗重最大且显著高于其他 3 个处理,“京紫糯 219”与“SBS902”在 T2 处理下穗长、穗粗及单穗重均显著高于 CK,“天紫 23”在 T1 处理下穗长、穗粗和单穗重表现最优且显著高于 CK($P<0.05$)。同时各鸡粪肥处理均显著提高了 4 个品种的有效穗数($P<0.05$)。因此,3 种品牌的鸡粪肥处理均可显著提升鲜食玉米的产量,不同品牌鸡粪肥对鲜食玉米产量构成要素的影响则存在品种间差异。

表 5 不同处理下 4 种鲜食玉米的产量及产量构成要素
Table 5 Yield and yield components of four fresh-eating corn varieties under different treatments

品种 Variety	处理 Treatment	穗长/cm Ear length	穗粗/mm Ear diameter	单穗重/g Ear weight	有效穗数/(10 ⁴ 穗/hm ²) No. of effective panicles	产量/(t/hm ²) Yield
农科糯 336 Nongkenuo 336	T1	18.15±0.31 ab	53.43±0.40 a	298.89±3.36 b	6.56±0.07 a	28.13±0.56 a
	T2	18.34±0.36 ab	53.88±0.44 a	304.09±6.05 b	6.56±0.03 a	29.13±0.66 a
	T3	18.51±0.09 a	54.41±0.56 a	312.49±1.57 a	6.49±0.09 a	27.88±0.59 a
	CK	17.73±0.50 b	51.66±0.72 b	284.45±4.76 c	6.31±0.06 b	25.28±1.46 b
京紫糯 219 Jingzinuo 219	T1	16.44±0.26 b	55.14±0.28 b	292.52±2.90 c	6.49±0.02 a	26.01±0.87 b
	T2	17.19±0.21 a	56.47±0.36 a	307.33±3.14 a	6.48±0.04 a	28.36±0.83 a
	T3	16.87±0.21 ab	55.98±0.45 a	301.16±1.39 b	6.45±0.14 ab	25.95±0.33 b
	CK	16.57±0.34 b	53.73±0.44 c	286.80±3.90 d	6.32±0.06 b	24.55±0.38 c
SBS902	T1	17.61±0.36 ab	54.56±0.50 a	253.78±0.51 b	6.46±0.06 ab	19.14±0.45 ab
	T2	18.08±0.11 a	53.85±0.14 a	267.31±6.23 a	6.47±0.15 a	20.61±1.19 a
	T3	17.07±0.62 bc	52.94±0.69 b	249.46±4.67 b	6.41±0.04 ab	17.66±1.01 bc
	CK	16.77±0.21 c	52.84±0.14 b	235.94±2.09 c	6.29±0.02 b	16.07±0.69 c
天紫 23 Tianzi 23	T1	18.69±0.35 a	46.71±0.46 a	249.89±2.88 a	6.65±0.10 a	20.35±0.14 a
	T2	17.82±0.15 b	46.53±0.35 a	237.47±5.10 b	6.63±0.13 a	20.94±1.01 a
	T3	18.50±0.44 a	45.32±0.07 b	232.65±1.88 bc	6.51±0.13 ab	20.28±0.25 a
	CK	17.87±0.30 b	45.48±0.41 b	228.85±4.75 c	6.44±0.06 b	17.34±0.67 b

2.5 不同鸡粪肥处理下鲜食玉米的干物质积累量

由图 4 和图 5 可见:在营养器官干物质积累方面,“天紫 23”根的干物质积累量(干重)及“京紫糯 219”

的茎干重在 3 个施肥处理下均显著高于 CK($P<0.05$)。“农科糯 336”的根和茎干重与“京紫糯 219”的茎干重在 T2 处理下达到峰值且显著高于 CK,

“SBS902”的茎和叶干重则在T1与T2处理下显著高于CK($P<0.05$)。在籽粒干物质积累方面,4个品种的苞叶与穗轴干重在施肥处理下普遍高于CK。“农科糯336”在T1处理下籽粒干重最高且显著高于T3和CK,而“SBS902”则在T2处理下最高且显著高于T3和CK($P<0.05$);从干物质总积累量来看,不同鸡粪肥处理(T1、T2和T3)均能显著提高4个品种的植株干重($P<0.05$)。“农科糯336”与“天紫23”在不同鸡粪肥处理间的促进效果无显著差异,而“京紫糯219”

和“SBS902”在T2处理下的干重显著高于T1和T3处理($P<0.05$),表明不同品种对鸡粪肥的响应存在差异。与对照(CK)相比,T2处理下“农科糯336”、“京紫糯219”、“SBS902”和“天紫23”的植株干重分别提高了25.3%、20.8%、20.4%和11.7%。因此,不同品牌的鸡粪肥处理均可显著提高鲜食玉米的干物质积累量($P<0.05$),但效果存在品种与处理间差异,其中T2处理在促进干物质总积累量方面的效果最为突出。

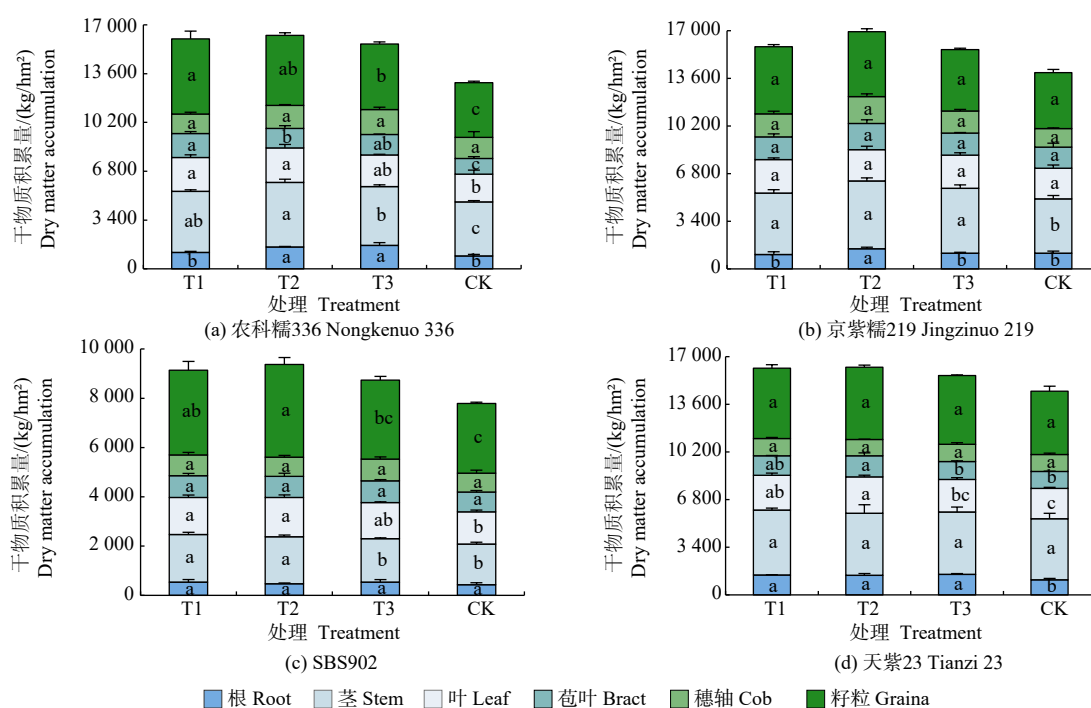


图4 不同处理下4种鲜食玉米不同器官的干物质积累量

Fig. 4 Dry matter accumulation in different organs of four fresh-eating corn under different treatments.

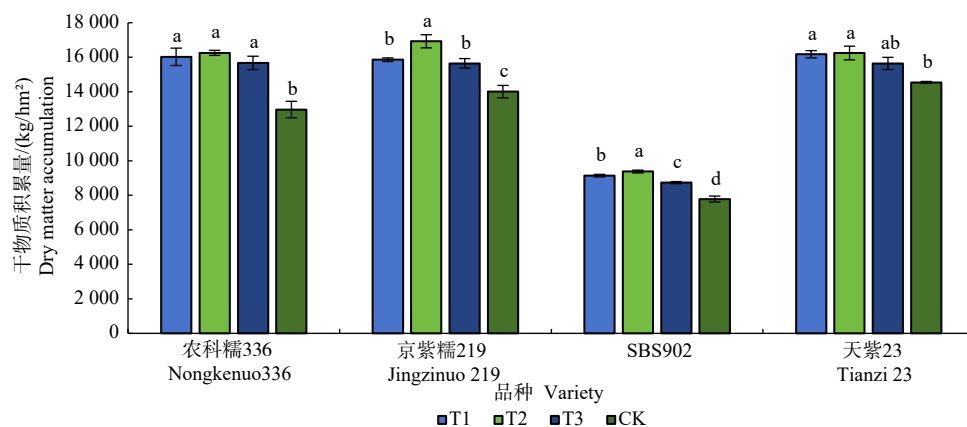


图5 不同处理下4种鲜食玉米的干物质积累量

Fig. 5 Dry matter accumulation of four fresh-eating corn under different treatments

3 讨 论

3.1 鸡粪肥对鲜食玉米的促生长效应及增产作用

鸡粪富含有机质及氮、磷、钾等作物必需营养元素,施入农田可促进作物生长、维持土壤肥力并改善土壤理化性质^[14,27]。本研究结果表明,相较于不施用鸡粪肥(CK),3种品牌的鸡粪肥处理均能提升鲜食玉米的株高和SPAD值,促进其营养生长,这一结果与李永平等^[28]增施鸡粪肥及Adekiya等^[29]单独使用鸡粪肥的研究相符。3种品牌的鸡粪肥处理较CK均能显著提高鲜食玉米产量及植株干物质积累量,这印证了鸡粪肥作为优质有机肥源的养分优势^[30],其效果与在玉米^[31-32]、黄瓜^[33]、小麦^[34]上的研究结果一致。尽管禽畜粪肥养分全面,但不同来源粪肥因加工处理方式不同,其养分有效性可能存在差异^[30]。本研究中3种品牌鸡粪肥处理下鲜食玉米的生长及产量表现为 $T2>T1>T3$,该结果与基于养分投入量的预期不完全一致。从氮素投入看,T3处理施氮量最高,却未表现出最优效果。玉米常规施氮量一般为 $173\sim 400\text{ kg/hm}^2$ ^[35],而T3处理氮投入远高于此范围上限,过量的氮素可能导致作物碳氮代谢紊乱、抑制根系发育,并降低养分利用效率^[26,36]。从养分平衡角度分析,罗佳等^[37]指出,有机肥中氮磷钾比例失衡会显著影响作物对磷、钾的吸收。T2处理的氮钾质量比 $1.9:1$ 更接近玉米适宜的氮钾协同比例 $1.5:1$ ^[38];而T3处理虽钾投入量与T2处理相近,但其氮钾质量比高达 $2.29:1$,这种失衡可能抑制钾的吸收利用,进而影响籽粒灌浆与产量形成^[39]。T1处理钾投入最高,但产量仍低于T2处理,可能因其氮素投入相对较低且氮钾质量比偏低($0.92:1$),影响了氮的吸收利用。此外,T3处理的磷投入量最低,氮磷质量比达 $5.38:1$,显著高于T1($1.58:1$)和T2($4.06:1$)处理,磷素不足也会在生殖生长关键期制约穗分化和籽粒建成^[40],这可能也是导致T3处理产量未达到与其最高氮投入相应预期水平的原因之一。

3.2 未腐熟干鸡粪肥推广使用的潜在风险

干鸡粪肥(T2/T3处理)在增产的同时也伴随着使用风险:例如,尽管T2处理在多数品种中产量最高,但其浸提液会显著抑制种子发芽;此外,T2/T3处理的发芽指数偏低($<70\%$),且烧苗率较高。这主要源于未腐熟鸡粪肥在土壤中发酵矿化

缓慢,施用后前期高盐分及可能含有的毒性物质易损伤幼苗根系^[41-42],这一现象凸显了干鸡粪肥应用中“增产潜力与苗期风险并存”的双重效应。在实践层面,洱海流域农户普遍采用鸡粪肥一次性基施的方式,此方式虽简化操作,却忽略了未腐熟粪肥前期毒性峰值与作物敏感期重叠的风险^[43]。因此,需进一步探究减量基施结合生育期追施的分次施肥模式,以平衡增产效果与毒性风险。值得关注的是,本研究中“天紫23”品种在T2/T3处理下烧苗率较低,表明品种耐受性差异可为鸡粪肥使用风险防控提供突破口。

除对作物种子和幼苗产生直接毒性外,来源不明、处理和施用不当的鸡粪肥产品还潜藏着更广泛的环境风险。洱海流域作为典型的高原湖泊农业区,农业面源污染是洱海氮磷污染负荷的主要来源之一,其中种植业污染贡献率就达 52.7% 。本研究中所用品牌2(T2)与品牌3(T3)的干鸡粪肥,其氮素施用量均超过常规水平。过量氮素难以被作物完全吸收,易以硝态氮等形式在土壤中残留,在流域集中降雨条件下,可通过径流与淋溶作用进入水体,加剧洱海富营养化风险^[44-45]。当前在洱海流域小农户的鸡粪肥流通链中,类似品牌2和3的干鸡粪肥投入品被广泛使用,实际施用量常等于或远超本试验水平,这进一步增加了洱海的污染风险。此外,随着规模化养殖的发展,高蛋白饲料和饲料添加剂被广泛应用,其中防治疾病或促生长的抗生素及重金属元素随饲料进入畜禽体内^[46-47]。鸡消化道较短,饲料消化率低,其粪便除富含营养元素外,还含有致病微生物、重金属及抗生素等残留物质。鸡粪处理不当不仅造成养分过剩,更会导致重金属等污染物在土壤、水体和大气中累积^[48],对动物及公共卫生安全构成潜在威胁^[49]。本研究区域位于以鸡粪肥为主要基肥的蔬菜集中种植区。区内沟渠系统水源主要来自苍山汇水,沿“苍山-洱海”流经种植区,承担着农田灌溉与排水功能^[50]。在降雨、灌溉及农事活动影响下,沟渠与农田地表水持续进行交换,而长期循环施用鸡粪肥的农田亦参与此水交换过程。因此,未来研究应着重定量评估当前鸡粪肥施用模式所携带的过量养分、重金属和抗生素经地表径流向沟渠及洱海迁移的污染负荷与生态风险。

3.3 同类湖泊保护区的畜禽粪肥污染扩散风险

洱海流域普遍采用的简易风干晾晒鸡粪肥直接还田模式,折射出我国多数地区禽畜粪便资源化利用的粗放共性^[51-52]。此类处理工艺仅涉及简单堆沤,既未添加辅料调控养分释放,也缺乏微生物无害化处理环节,施入土壤后易引发盐分累积、病原菌扩散等“后遗症”^[53]。在江河湖泊等敏感流域,此类不当施用更易构成显著的面源污染风险。研究表明,自20世纪60年代以来,中国重要流域如滇池、五大湖泊、三峡库区水体氮、磷富营养化程度的加剧与畜禽养殖业的扩张密切相关^[54],桑一文等^[55]基于2000—2022年国控断面数据,亦指出畜禽养殖是长江流域湖泊富营养化的成因之一。为应对污染,湖泊保护区普遍实施了禁养限养政策。以云南为例,抚仙湖流域全面禁止养殖,星云湖流域调整优化畜禽禁限养区,杞麓湖流域实施分区管控。虽然这类政策有效缓解了保护区内的本地污染源,但其潜在的“外溢效应”值得关注:洱海流域出现的“禁养区政策→外购粪肥→粗放施用”链条,是否也存在于其他保护区?即禁养政策是否在转移污染源头的同时,通过催生经过粗放处理的“粪肥投入品”跨区域贸易,并伴随不当施用,最终将污染风险以另一种形式扩散?这折射出的可能是我国湖泊保护区农业面临的共性困境——局部污染控制与区域资源循环及污染转移风险之间的矛盾,其普遍性需进一步调研验证。

3.4 畜禽粪污资源化利用的优化路径

全国层面,畜禽粪污年产生量高达38亿t,但综合利用率不足60%。聚焦云南省,其粪污年产生量达1.4亿t,其中大理州粪污产生量占全省总量的9.6%,约1353.9万t,且肉蛋鸡粪污占比达4.8%^[56]。肥料化是畜禽粪便最主要的资源化利用方式,主要方式有直接还田、堆肥后还田和生产有机肥^[57],在实际运行中,利用方式因地区、规模和模式有较大差异^[4]。在洱海流域等以小农户为主的地区,流通的粪肥多源自中小型养殖场,利用方式往往欠佳。更严峻的制约在于,畜禽粪便转化为商品有机肥面临设备、辅料、包装等的高成本投入,市场狭小、质量参差及施用季节性等瓶颈,导致有机肥加工企业数量少且积极性低,进一步阻碍了粪便资源的优化利用。因此,当前我国畜禽粪便资源化利用面临的核心矛盾是巨大的产生量与低效、粗放的

肥料化利用方式并存,亟需解决成本控制、技术推广与产业链协同等关键问题。

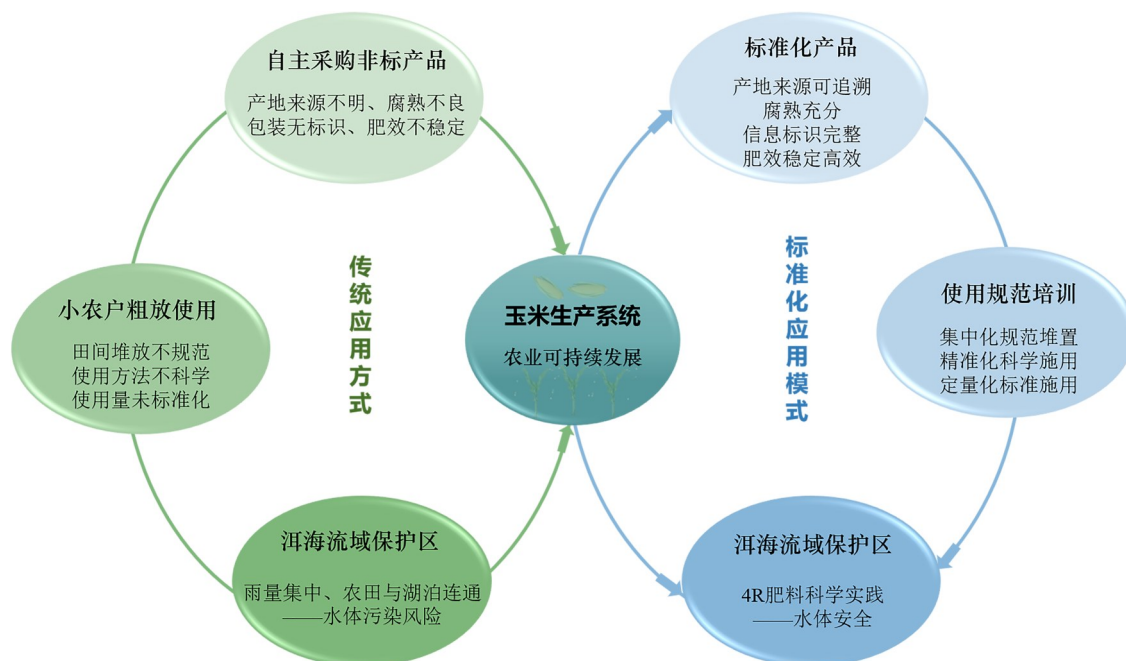
针对鸡粪肥来源差异导致的增产效应与环境风险交织预警、湖泊保护区粪肥资源化利用粗放化等问题,构建兼顾生态安全与生产效益的轻简解决方案已成为当务之急。研究表明堆肥处理可消减粪便中的抗生素和病原体,并可将粪便转化为更安全、更稳定的材料,从源头降低面源污染风险^[46],这也解释了本研究中品牌1(T1处理)的鸡粪肥相对安全的原因。本研究进一步发现,鲜食玉米品种对鸡粪肥的耐受性存在显著差异:“天紫23”对未腐熟干鸡粪肥表现出较强的耐受性,且4个品种在腐熟鸡粪有机肥条件下均能实现安全增产,这为优化施肥提供了更具实操性的“以种定肥”策略——“天紫23”相较于其他品种在T2和T3处理下烧苗率最低且产量稳定,适合在干鸡粪肥施用区域优先推广;“农科糯336”、“京紫糯219”、“SBS902”可优先选用腐熟度更高的鸡粪有机肥,或搭配干鸡粪肥配套腐熟工艺以降低使用风险。针对流域内流通的干鸡粪肥投入品,本研究建议推动小农户联合建立区域集中腐熟中心,逐步将品牌2和3一类的干鸡粪肥转化为标准化有机肥产品,详见图6。该模式以“标准化应用”为核心,兼具堆肥减毒的环境效益与粪肥源头的风险规避作用,进一步结合作物品种的生产适应性,旨在集成一个低技术门槛的小农户风险防控方案。本研究设想的技术路径,有望助力缓解湖泊保护区内“污染控制-资源利用”之间的现实矛盾,并为生态敏感区域实现小农户有机种植的可持续发展提供可借鉴的技术范式。

4 结 论

为明确洱海流域小农户模式下不同品牌鸡粪肥的应用效果、增产潜力及风险,本研究以当地流通的3种鸡粪肥(T1:标准化鸡粪有机肥;T2和T3:干鸡粪肥)及4个鲜食玉米品种为对象,探究了鸡粪肥对种子萌发、幼苗安全、关键农艺性状及产量的综合效应。主要结论如下:

1)鸡粪肥具有显著的促生增产效应,但洱海流域广泛流通的干鸡粪肥存在明显的苗期安全风险,表现为种子萌发受抑、胚根生长受阻及田间烧苗率升高。

2)不同鸡粪肥的应用效果差异显著,建议小农



4R:由国际植物营养研究所提出的植物营养管理策略,包含正确的肥料品种、正确的施用量、正确的施用时间和正确的施用位置共4个核心维度。

4R: A plant nutrient management strategy proposed by the International Plant Nutrition Institute. It encompasses four core dimensions: right fertilizer source, right rate, right time, and right place.

图6 洱海流域小农户模式下鸡粪肥应用优化框架

Fig. 6 Optimization framework of chicken manure application under small farmer mode in Erhai Lake Basin

户优先选用腐熟度高、安全性好的标准化鸡粪有机肥(如品牌1),以实现稳产增产并有效规避苗期风险。

3)鲜食玉米品种对鸡粪肥的耐受性存在显著差异,可根据品种特性实施“以种定肥”策略,优先搭配耐受性强的品种或统一采用标准化有机肥,以协同提升产量与栽培安全性。

参考文献 References

- [1] Zhong S, Geng Y, Qian Y, Chen W, Pan H. Analyzing ecosystem services of freshwater lakes and their driving forces: The case of Erhai Lake, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26: 10219-10229
- [2] Hou Y, Xu W, Cong W F, Jin K M, Xu J L, Ying H, Wang S R, Sheng H, Yang L Z, Ma W Q, Oenema O, Zhao Z X, Zhang F S. Agricultural green development in the Erhai lake basin: The way forward [J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2023, 10(4): 510-517
- [3] Drózd D, Wystalska K, Malińska K, Grosser A, Grobelak A, Kacprzak M. Management of poultry manure in Poland: Current state and future perspectives [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 264: 11032
- [4] 刘春, 刘晨阳, 王济民, 辛翔飞. 我国畜禽粪便资源化利用现状与对策建议 [J]. *中国农业资源与区划*, 2021, 42(2): 35-43
- [5] 张梓涵, 张旭琳, 姜超, 尹高飞, 冯培培, 汪昊, 李文超. 作物结构对大理古生片区农田集水区氮磷输出的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2025, 44(1): 140-152
- [6] 黄雅琪, 周也富, 应飞宇, 胡小康, 梁建芬. 几种鲜食玉米在洱海流域种植的表现品质评价 [J]. *中国农业大学学报*, 2024, 29(5): 1-14
- [7] 蒋雨洲, 王甲, 张宏媛, 冯文豪, 王鹏, 李玉义. 化肥配施有机物料对玉米田土壤细菌和真菌群落结构的影响 [J]. *作物学报*, 2025, 51(5): 1378-1388
- [8] 夏光利, 毕军, 张昌爱, 毕研文, 张萍, 史桂芳, 朱国梁, 夏中华. 腐熟灭菌鸡粪与不同浓度化肥配施效果研究 [J]. *中国农学通报*, 2004, 20(1): 165-166
- [9] Rasool A, Ghani A, Nawaz R, Ahmad S, Shahzad K, Rebi A, Ali B, Zhou J X, Ahmad M I, Tahir M F, Alwahibi M S, Elshikh M S, Ercisli S. Effects of poultry manure on the growth, physiology, yield, and yield-related traits

- of maize varieties[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(29): 25766-25779
- [10] 李永平, 史向远, 周静, 张晓晨. 鸡粪深施对土壤呼吸速率及玉米产量的影响[J]. 作物杂志, 2013(2): 104-107
Li Y P, Shi X Y, Zhou J, Zhang X C. Effects of deep application of chicken manure on soil respiration rate and maize yield[J]. *Crops*, 2013(2): 104-107 (in Chinese)
- [11] 徐军, 虞德兵, 冯彬彬, 曹嘉铨, 周正, 邹彩霞. 不同来源鸡粪有机肥对西瓜-青贮玉米产量、品质的影响及效益分析[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(10): 89-97
Xu J, Yu D B, Feng B B, Cao J C, Zhou Z, Wu C X. Effects of different organic chicken manure fertilizers on the yield and quality of watermelon-silage maize and benefit analysis [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(10): 89-97 (in Chinese)
- [12] 于春晓, 张丽莉, 杨立杰, 武开阔, 李文涛, 宋玉超, 李东坡, 武志杰. 减氮配施抑制剂及鸡粪提高尿素氮在稻田土壤中的转化及利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(9): 1581-1591
Yu C X, Zhang L L, Yang L J, Wu K K, Li W T, Song Y C, Li D P, Wu Z J. Combining N-inhibitor and chicken manure with reduced N fertilizer to improve the conversion and utilization of fertilizer N in a paddy soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(9): 1581-1591 (in Chinese)
- [13] 吴茜虞, 雷宝坤, 徐卓颖, 续勇波, 李孙宁. 洱海流域有机肥全量替代化肥满足水稻氮素营养并减少土壤气态活性氮排放[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(2): 252-267
Wu X Y, Lei B K, Xu Z Y, Xu Y B, Li S N. Total organic fertilizer substitution of nitrogen fertilizer in Erhai watershed can satisfy rice nitrogen nutrition and reduce gaseous reactive nitrogen emission in paddy fields [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2024, 30(2): 252-267 (in Chinese)
- [14] Yeasmin S, Uddin M K, Chowdhury M A H, Mohiuddin K M, Saha B K. Poultry manure-urea fertilizer potentially influences nitrogen use efficiency, nutritional quality, and yield of baby corn (*Zea mays* L.) [J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2024, 18: 101409
- [15] 吴凡, 张克强, 谢坤, 王凤, 王瑞琦, 尹高飞, 沈仕洲. 洱海流域典型农区不同施肥处理下稻田氮挥发变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1735-1742
Wu F, Zhang K Q, Xie K, Wang F, Wang R Q, Yin G F, Shen S Z. Characteristics of ammonia volatilization from rice paddy fields under different fertilization treatments in typical agricultural areas of Erhai basin [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1735-1742 (in Chinese)
- [16] NY/T 525—2021 有机肥料[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021
NY/T 525—2021 Organic fertilizer[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2021 (in Chinese)
- [17] GB/T 3543. 4—1995 农作物种子检验规程发芽试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995
GB/T 3543. 4—1995 Rules for agricultural seed testing: Germination test[S]. Beijing: Standards Press of China, 1995 (in Chinese)
- [18] 陈星. 利用发芽指数评价堆肥腐熟度方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022
Chen X. Study on evaluation method of compost maturity by germination index[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022 (in Chinese)
- [19] 王健豪, 张中彬, 钱泳其, 蒋发辉, 董芳瑾, 甘磊, 彭新华. 东北薄层黑土区根系抗土壤压实的覆盖作物品种筛选[J]. 土壤, 2025, 57(1): 167-178
Wang J H, Zhang Z B, Qian Y Q, Jiang F H, Dong F J, Gan L, Peng X H. Screening of compaction-resistant cover crop varieties suitable for black soil region of Northeast China[J]. *Soils*, 2025, 57(1): 167-178 (in Chinese).
- [20] 张建桃, 吴逢秋, 黄路生, 刘广彬, 文晟, 兰玉彬. 植保无人机喷施菊菜叶面肥参数的优化[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(2): 284-292
Zhang J T, Wu F Q, Huang L S, Liu G B, Wen S, Lan Y B. Optimizing parameters for spraying foliar fertilizer on *Acanthopanax trifoliatum* with unmanned aerial vehicle[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2025, 44(2): 284-292 (in Chinese)
- [21] 刘泉东, 孙伟, 张华, 刘小龙, 李辉, 王虎存. 跨越式膜上对行覆土装置设计与覆土性能研究[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(5): 1173-1184
Liu Q D, Sun W, Zhang H, Liu X L, Li H, Wang H C. Design and performance study of leaping-over type soil covering device on film[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2024, 36(5): 1173-1184 (in Chinese)
- [22] 张旭. 钾肥对鲜食玉米生长发育及其产量效应的影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021
Zhang X. Effects of nitrogen and potassium on growth and yield of fresh corn [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021 (in Chinese)
- [23] 石子建, 唐鹏, 许竹淑, 雷俊, 李韵, 邵晓伟, 姜欢, 汪寿根, 徐建祥. 化肥减量配施有机肥对鲜食玉米产量品质和土壤理化性质的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(5): 77-82
Shi Z J, Tang P, Xu Z W, Lei J, Li Y, Shao X W, Jiang H, Wang S G, Xu J X. Influences of chemical fertilizer reduction combined with organic fertilizer on yield and quality of fresh corn and soil physicochemical properties [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(5): 77-82 (in Chinese)
- [24] 娄菲, 左峰平, 李萌, 代鑫萌, 王健, 韩金玲, 吴舒, 李向岭, 段会军. 有机肥替代部分化肥氮对糯玉米产量、品质及氮素利用的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(4): 1053-1064
Lou F, Zuo Y P, Li M, Dai X M, Wang J, Han J L, Wu S, Li X L, Duan H J. Effects of organic fertilizer substituting chemical fertilizer nitrogen on yield, quality, and nitrogen efficiency of waxy maize [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(4): 1053-1064 (in Chinese)
- [25] 姜春霞, 刘化涛, 张伟, 杨柯, 张冬梅, 翟广谦, 王娟玲, 刘恩科. 减量施氮对鲜食玉米产量、氮素利用及土壤硝态氮含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(12): 61-67
Jiang C X, Liu H T, Zhang W, Yang K, Zhang D M, Zhai G Q, Wang J L, Liu E K. Effect of reduced nitrogen application on yield, nitrogen utilization of fresh waxy maize and soil nitrate nitrogen content in Shanxi dryland [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(12): 61-67 (in Chinese)
- [26] 廖若星, 胡云, 蒲甜, 陈国鹏, 梁冰, 封亮, 杨文钰, 王小春. 密度与氮素互作对带状套作玉米产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(12): 25-38
Liao R X, Hu Y, Pu T, Chen G P, Liang B, Feng L, Yang W Y, Wang X C. Effect of density and nitrogen interaction on the yield of maize in maize-soybean relay strip intercropping [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(12): 25-38 (in Chinese)
- [27] 邓雯文, 陈姝娟, 何雪萍, 晋蕾, 杨盛智, 余秀梅, 刘书亮, 邹立扣. 鸡粪-堆肥中重金属残留、抗生素耐药基因及细菌群落变化研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(2): 439-450
Deng W W, Chen S J, He X P, Jin L, Yang S Z, Yu X M, Liu S L, Zou L K. Dynamics of heavy metal residues, antibiotic resistance genes, and bacterial communities during chicken manure composting [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(2): 439-450 (in Chinese)
- [28] 李永平, 田艳, 史向远, 周静, 张晓晨, 朱教宁, 林琨, 赵丽. 施用畜禽粪肥对土壤呼吸和玉米产量的影响及其增效分析[J]. 华北农学报, 2017, 32(1): 193-200
Li Y P, Tian Y, Shi X Y, Zhou J, Zhang X C, Zhu J N, Lin L, Zhao L. Effects of animal manures on soil respiration and maize yield and economic analysis [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(1): 193-200 (in Chinese)

- [29] Adekiya A O, Ogunboye O I, Ewulo B S, Olayanju A. Effects of different rates of poultry manure and split applications of urea fertilizer on soil chemical properties, growth, and yield of maize[J]. *The Scientific World Journal*, 2020, 2020(1): 4610515
- [30] 姜茜, 王瑞波, 孙炜琳. 我国畜禽粪便资源化利用潜力分析及对策研究: 基于商品有机肥利用角度[J]. 华中农业大学学报: 社会科学版, 2018(4): 30-37, 166
- Jiang Q, Wang R B, Sun W L. Potential evaluation and countermeasures on livestock manure resource utilization: Based on perspective of commercial organic fertilizer utilization [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University: Social Sciences Edition*, 2018(4): 30-37, 166 (in Chinese)
- [31] Al-Otayk S, Motawei M I, El-Shinawy M Z. Genetic variation in yield of five hybrids of sweet corn grown under poultry manure and nitrogen fertilizers and the presence of the nitrate reductase gene (*Nia2*)[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2008, 88(1): 93-100
- [32] Essilfie M E, Darkwa K, Asamoah V. Growth and yield response of maize to integrated nutrient management of chicken manure and inorganic fertilizer in different agroecological zones[J]. *Heliyon*, 2024, 10(14): e34830
- [33] 关天霞, 马国泰, 马志录, 刘芝妨, 张芬琴, 张有富, 邓江霞, 马小华, 韩雨思. 连续施用鸡粪对露地黄瓜产量、品质和土壤性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(8): 1351-1360
- Guan T X, Ma G T, Ma Z L, Liu Z F, Zhang F Q, Zhang Y F, Deng J X, Ma X H, Han Y S. Effects of continuous application of chicken manure on field-grown cucumber yield, quality, and soil properties[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(8): 1351-1360 (in Chinese)
- [34] 冶康康, 俄胜哲, 袁金华, 赵天鑫, 路港澳, 张鹏, 刘雅娜. 施用不同有机物料对作物产量及灌漠土磷组分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2025, 43(1): 91-102
- Ye G K, E S Z, Yuan J H, Zhao T X, Lu G B, Zhang P, Liu Y N. Effects of different organic materials returning on crop yield and phosphorus composition in irrigated desert soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2025, 43(1): 91-102 (in Chinese)
- [35] 杜文婷, 雷肖肖, 卢慧宇, 王云凤, 徐佳星, 罗彩霞, 张树兰. 氮肥减量施用对我国三大粮食作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(24): 4863-4878
- Du W T, Lei X X, Lu H Y, Wang Y F, Xu J X, Luo C X, Zhang S L. Effects of reducing nitrogen application rate on the yields of three major cereals in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(24): 4863-4878 (in Chinese)
- [36] 赵亚南, 宿敏敏, 吕阳, 况福虹, 陈轩敬, 张跃强, 石孝均. 减量施肥下小麦产量、肥料利用率和土壤养分平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 864-873
- Zhao Y N, Su M M, Lyu Y, Kuang F H, Chen X J, Zhang Y Q, Shi X J. Wheat yield, nutrient use efficiencies and soil nutrient balance under reduced fertilizer rate[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(4): 864-873 (in Chinese)
- [37] 罗佳, 蒋小芳, 孟琳, 黄启为, 徐阳春, 沈其荣, 杨兴明. 不同堆肥原料的有机无机复合肥对油菜生长及土壤供氮特性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 97-106
- Luo J, Jiang X F, Meng L, Huang Q W, Xu Y C, Shen Q R, Yang X M. Effects of chemical fertilizer and different composts on growth of oilseed rape and soil nitrogen supply[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1): 97-106 (in Chinese)
- [38] 樊叶, 张丽丽, 樊琳琳, 薛兵东, 仇真, 高洪敏, 王静. 氮钾互作对玉米产量和干物质积累的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(2): 209-214
- Fan Y, Zhang L L, Fan L L, Xue B D, Qiu Z, Gao H M, Wang J. Effects of nitrogen and potassium interaction on yield and dry matter accumulation in maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(2): 209-214 (in Chinese)
- [39] 王宜伦, 韩燕来, 张许, 谭金芳. 氮磷钾配比对高产夏玉米产量、养分吸收积累的影响[J]. 玉米科学, 2009, 17(6): 88-92
- Wang Y L, Han Y L, Zhang X, Tan J F. Effects of different fertilizers on yield and plant nutrient accumulation of high-yield summer maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2009, 17(6): 88-92 (in Chinese)
- [40] 梁建芬, 汪小芳, 刘天仪, 程凌云, 王悦力. 田间磷肥管理对玉米产能和功能营养成分的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(9): 27-36
- Liang J F, Wang X F, Liu T Y, Cheng L Y, Wang Y L. Effects of field phosphate fertilizer management on the energy-yielding and functional nutrients of maize[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(9): 27-36 (in Chinese)
- [41] 倪治华, 孙万春, 林辉, 钟杭, 朱伟锋, 陆若辉, 马军伟. 浙江省畜禽粪源有机肥质量安全风险与控制对策[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(2): 299-307
- Ni Z H, Sun W C, Lin H, Zhong H, Zhu W F, Lu R H, Ma J W. Quality risk assessment and management of manure based organic fertilizers in Zhejiang[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2020, 32(2): 299-307 (in Chinese)
- [42] 吴浩玮, 孙小淇, 梁博文, 陈家斌, 周雪飞. 我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1168-1176
- Wu H W, Sun X Q, Liang B W, Chen J B, Zhou X F. Analysis of livestock and poultry manure pollution in China and its treatment and resource utilization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1168-1176 (in Chinese)
- [43] 李书田, 刘荣乐, 陕红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 179-184
- Li S T, Liu R L, Shan H. Nutrient contents in main animal manures in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 179-184 (in Chinese)
- [44] 李燕青. 不同类型有机肥与化肥配施的农学和环境效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016
- Li Y Q. Study on agronomic and environmental effects of combined application of different organic manures with chemical fertilizer[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016 in Chinese
- [45] 肖作敏, 刘鹏祺, 史晴雯, 王明阳, 吴语满, 陈卓, 营浩, 丛汶峰. 洱海流域水稻氮足迹与减排潜力预测[J]. 中国生态农业学报: 中英文, 2024, 32(8): 1311-1321
- Xiao Z M, Liu P Q, Shi Q W, Wang M Y, Wu Y X, Chen Z, Ying H, Cong W F. Rice nitrogen footprint and prediction of emission reduction potential in the Erhai Lake Basin[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(8): 1311-1321 (in Chinese)
- [46] Deng W W, Zhang A Y, Chen S J, He X P, Jin L, Yu X M, Yang S Z, Li B, Fan L Q, Ji L, Pan X, Zou L K. Heavy metals, antibiotics and nutrients affect the bacterial community and resistance genes in chicken manure composting and fertilized soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 257: 109980
- [47] Vacchina V, Ionescu C, Oguey S, Lobinski R. Determination of Zn²⁺, Cu²⁺ and Mn²⁺-glycinate complexes in feed samples and *in-vitro* and *in-vivo* assays to assess their bioaccessibility in feed samples[J]. *Talanta*, 2013, 113: 14-18
- [48] Morvan T, Gogé F, Oboyet T, Carel O, Fouad Y. A dataset of the chemical composition and near-infrared spectroscopy measurements of raw cattle, poultry and pig manure[J]. *Data in Brief*, 2021, 39: 107475
- [49] Sarmah A K, Meyer M T, Boxall A B A. A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(5): 1169-1186

725-759

- [50] 谢坤, 罗元, 冯弋洋, 何秋平, 张克强, 沈仕洲, 王凤. 洱海海西不同种植类型下农灌沟渠雨季水质变化特征与综合评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2387-2396
- Xie K, Luo Y, Feng Y Y, He Q P, Zhang K Q, Shen S Z, Wang F. Comprehensive evaluation of water quality changes in agricultural irrigation ditches in the rainy season under different planting patterns in the west of Erhai, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2387-2396 (in Chinese)
- [51] 崔勇, 王晓媛, 王彦琪, 李喜红, 王旭敏, 赵东, 高建伟, 王明国. 畜禽粪污还田对作物生长的影响及化肥替减研究进展[J]. 安徽农业科学, 2025, 53(4): 11-18, 52
- Cui Y, Wang X Y, Wang Y Q, Li X H, Wang X M, Zhao D, Gao J W, Wang M G. Research progress on the effect of livestock and poultry waste returning to field on crop growth and chemical fertilizer substitution[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2025, 53(4): 11-18, 52 (in Chinese)
- [52] 王欣雅, 赵彤彤, 黄少辉, 杨文方, 张晴雯, 贾良良. 化肥减量增效下山东省农牧系统氮素流动特征和氮肥减施潜力分析[J]. 农业环境科学学报, 2025, 13(7): 1-16
- Wang X Y, Zhao T T, Huang S H, Yang W F, Zhang Q W, Jia L L. Nitrogen flow characteristics and fertilizer reduction potential of crop-livestock systems in Shandong Province under the policy of fertilizer reduction and efficiency increase[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 13(7): 1-16 (in Chinese)
- [53] 刘更另. 中国有机肥料[M]. 北京: 中国农业出版社, 1991: 38-59
- Liu G L. *China Organic Fertilizer*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1991: 38-59 (in Chinese)
- [54] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, Kolbe H. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017
- Zhang W L, Wu S X, Ji H J, H K. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1008-1017 (in Chinese)
- [55] 桑一文, 周志彬, 孙福红, 常红, 王子腾. 2000—2022年长江流域典型湖泊氮磷浓度变化的自然与社会驱动因子定量解析研究[J]. 环境科学学报, 2025, 45(5): 490-502
- Sang Y W, Zhou Z B, Sun F H, Chang H, Wang Z T. Quantitative analysis of natural and societal driving factors of nitrogen and phosphorus concentration changes in typical lakes of the Yangtze River Basin from 2000 to 2022 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2025, 45(5): 490-502 (in Chinese)
- [56] 邓亚琴, 王宇蕴, 李兰, 赵兵, 张勇, 马丽婷, 徐智. 云南省畜禽粪污土地消纳能力的评估及其肥料化发展前景[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2419-2427
- Deng Y Q, Wang Y Y, Li L, Zhao B, Zhang Y, Ma L T, Xu Z. Evaluation of land absorption capacity for livestock and poultry waste in Yunnan Province and development prospect for fertilizer utilization [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2419-2427 (in Chinese)
- [57] 仇焕广, 莫海霞, 白军飞, 蔡亚庆, 王金霞. 中国农村畜禽粪便处理方式及其影响因素: 基于五省调查数据的实证分析[J]. 中国农村经济, 2012(3): 78-87
- Qiu H G, Mo H X, Bai J F, Cai Y Q, Wang J X. Disposal methods and influencing factors of livestock and poultry manure in rural areas of China: An empirical analysis based on survey data of five provinces [J]. *Chinese Rural Economy*, 2012(3): 78-87 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 车怡娇, 云南大学农学院在读研究生, 主要从事鲜食玉米栽培技术研究。负责并完成云南大学第三专业学位研究生实践创新项目(ZC-23236705); 参与北农(海利)涿州种衣剂企业项目(BNHL-EHAGD 2024-001)。曾获第十一届“挑战杯”云南省大学生创业计划竞赛铜奖。



通讯作者简介: 李健强, 中国农业大学教授, 博士生导师, 种子病害检验与防控北京市重点实验室主任。曾任学校研究生院副院长、党委研工部部长、常务副院长、学校党委委员, 种子健康中心主任。主要从事种子病理学及种子保健技术研究。本科、硕士和博士均毕业于原北京农业大学现中国农业大学植物病理学专业, 曾在美国密苏里大学哥伦比亚分校从事博士后研究。学术兼职包括北京植物病理学会理事长、中国植物病理学会种子病理专业委员会荣誉主任委员, 曾任系主任、学院副院长、中国植物病理学会副理事长等。主持国家自然科学基金项目(31571958, 31371910, 31071726, 30671396, 30070864)、国家科技支撑计划子课题、科技部 863 项目子课题、国家行业科技专项(201003066-1)。2004 年入选教育部“新世纪优秀人才支持计划”。