

DOI: 10.20103/j.stxb.202403080476

杨 铎, 陈玥勤, 汪 勤, 魏平慧, 楼 珏. 早稻产量和两栖动物发育对增效肥料及水分管理的响应. 生态学报, 2025, 45(16): - .
Yang X, Chen Y Q, Wang Q, Wei P H, Lou J. Early rice yield and amphibian development in response to enhanced fertilizer and water management. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(16): - .

早稻产量和两栖动物发育对增效肥料及水分管理的响应

杨 铎¹, 陈玥勤¹, 汪 勤¹, 魏平慧¹, 楼 珏^{2,*}

1 上饶市农业创新技术研究院, 上饶师范学院生命科学学院, 上饶 334001

2 全省浙南作物育种重点实验室, 温州科技职业学院(温州市农业科学研究院), 温州 325006

摘要: 由于受各种威胁, 包括施肥和水管理等农业活动, 全球两栖动物的多样性正在下降。为了解决这个问题, 已经为水稻种植开发了环保友好型的栽培方法。本研究以蝌蚪为模型, 采用盆栽试验, 研究了淹水栽培和增效氮肥对泽陆蛙蝌蚪发育和早稻生长的影响。蝌蚪与水稻共培养一个月, 直到发育出前肢。结果表明, 使用普通尿素对蝌蚪的存活率产生了负面影响, 成活率仅为 12.5%, 而不施氮肥处理的成活率为 90%, 包膜尿素处理的成活率为 70%。淹水深度对蝌蚪存活率无显著影响, 但与 5cm 淹水处理 (51.7%) 相比, 3cm 深度的淹水栽培存活率更高 (63.3%)。普通尿素增加了田面水的 pH 值和硝态氮浓度。施氮处理水稻产量显著高于不施氮处理, 但不同施氮处理间的差异无统计学意义。本研究结果表明包膜尿素是一种生态友好型肥料, 可有效维持水稻产量和蝌蚪生长, 有助于减轻农业活动对两栖动物多样性的影响。

关键词: 淹水种植; 树脂包膜尿素; 蝌蚪; 产量构成; 水稻

Early rice yield and amphibian development in response to enhanced fertilizer and water management

YANG Xin¹, CHEN Yueqin¹, WANG Qin¹, WEI Pinghui¹, LOU Jue^{2,*}

1 Shangrao Innovation Institute of Agricultural Technology, College of Life Science, Shangrao Normal University, Shangrao 334001, China

2 Southern Zhejiang Key Laboratory of Crop Breeding, Wenzhou Vocational College of Science and Technology (Wenzhou Academy of Agricultural Sciences), Wenzhou 325006, China

Abstract: Amphibian diversity is declining globally due to various threats, including agricultural practices such as fertilization and water management. To mitigate these impacts, eco-friendly cultivation methods have been developed for rice-based systems. In this study, we conducted a pot experiment to examine the effects of deep flooding cultivation and enhanced nitrogen (N) fertilizer on tadpole development and early rice production, using *Fejervarya multistriata* as a model species. Tadpoles were co-cultured with rice for one month, and their hind limbs developed. The results revealed that using urea fertilizer significantly reduced tadpole survival, with a 12.5% survival rate compared to 90% for no N fertilizer and 70% for coated urea. Flooding depth had no significant effect on survival, although tadpoles showed a higher survival rate at a 3-cm-depth flooding depth (63.3%) compared to a 5-cm-depth cultivation (51.7%). Urea application increased surface water pH and nitrate concentration. Rice yield was significantly higher with N fertilizer than without N, but there was no notable difference between the different N treatments. Coated urea proved effective in maintaining both rice yield and tadpole

基金项目: 江西省教育厅科技研究项目 (GJJ211726); 浙南作物育种重点实验室开放项目 (2021SZCB02); 浙江省农业品种选育重大科技专项 (2021C02063-3-4)

收稿日期: 2024-03-08; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: loujue@wzvcst.edu.cn

growth. These findings suggest that eco-friendly cultivation methods can help reduce the negative impact of agricultural activities on amphibian diversity.

Key Words: flooding cultivation; polymer-coated urea; tadpole; yield component; rice

在全球范围内,生物多样性正面临重大威胁,其中两栖动物是受影响最严重的群体之一^[1]。事实上,红色名录中超过 40 % 受威胁的物种为两栖动物,主要是由城市化、水体污染、森林砍伐和入侵物种等因素引起的^[2-3]。其中农用化学品污染对生活在稻田中的物种会产生严重影响。有研究表明杀虫剂和除草剂会导致两栖动物个体畸形和种群下降,并对其生理过程产生不良影响^[4]。然而,人们经常忽视的化肥也会导致这些问题。化肥是农用化学品投入中最重要的部分,尤其是氮肥^[5-6]。以中国为例,水稻的平均氮肥施用量在 145—300 kg/hm² 之间,其中 150—250 kg/hm² 是最常见的。氮肥的不合理施用会导致稻田土壤中无机氮的急剧增加,比如铵态氮和硝态氮,这会伤害两栖动物的卵和蝌蚪。大量的研究表明高铵盐和硝酸盐水平对两栖动物种群均存在不利影响,也会使其红细胞产生微核和核异样^[7-10]。

水稻生产中常施用以尿素和硫酸铵为代表的速效氮肥,这类肥料会快速溶解,造成氮素损失和环境问题^[6, 11]。而农民往往在水稻移栽前施用大量的氮肥,这会加剧氮素损失,并导致水稻的氮肥利用率降低^[12-13]。为了解决这个问题,已经开发了用于水稻种植的包膜尿素产品^[14]。包膜尿素是一类通过在颗粒外表包裹一层薄膜材料形成物理屏障来减缓养分释放的尿素产品^[15]。田间研究表明,施用包膜尿素对水稻产量和氮素利用效率有积极影响,同时使土壤和水中的无机氮浓度低于未包膜尿素^[14, 16]。然而,包膜尿素对蝌蚪生长发育的影响尚未在实验室或稻田中进行研究。

水分管理是水稻种植的另一重要方面。在整个生育期,干湿交替是一种常见的做法^[17]。在水稻苗期,田面水通常保持在 3—5 cm 的深度,一般持续一个月,以促进分蘖。这个时期也是某些稻田两栖动物的繁殖季节,例如泽陆蛙、饰纹姬蛙和林蛙等。它们一般将卵产于有水的稻田并孵化出蝌蚪,其依靠田面水生存,田面水的质量对于水生生物的发育至关重要^[18]。尽管传统的淹水栽培有好处,但人们对水稻生产中的水管理及其对氮损失的影响提出了担忧。田间调查表明,加大淹水深度有助于减少氨排放,从而提高水稻氮利用效率^[19]。水位及其变化对两栖动物的存活和发育是有影响的。不同深度的水位会对蝌蚪的生长发育产生不同的影响,高水位的蝌蚪要比低水位处理的发育历期更长,体重更大^[20]。当水位逐渐降低的时候,黑斑侧褶蛙蝌蚪会缩短变态时长,并加速变态发育进程,但是个体会偏小,不利于成功登陆^[21]。不过这些研究并未将其他因素考虑其中,比如养分投入,研究水位与氮肥互作将有利于更全面了解蝌蚪的实际发育情况。

本文采用盆栽试验研究了不同氮肥品种和淹水深度对两栖动物和早稻产量的影响。旨在检验两个假设:首先,与分施尿素相比,一次性施用的包膜尿素能逐渐释放氮会对蝌蚪的生存、发育和水稻产量更有利。其次,更深的淹水将对蝌蚪发育和水稻生长产生积极影响。

1 材料与方法

1.1 蝌蚪和水稻品种

于 2021 年 4 月在江西省上饶市日升村的稻田里采集了泽陆蛙的蝌蚪。经鉴定发育期为 Gosner 21—23^[22]。泽陆蛙属无尾目叉舌蛙科,是一种常见于稻田的两栖动物^[23]。将蝌蚪转移到上饶师范学院的实验室。所有蝌蚪生活在含有 3 L 水的水箱中,并在受控光周期(12 D:12 L)和温度(26±1)℃ 的人工温室中适应一周。在此期间,主要喂食煮熟的蛋黄。水稻品种为赣菌稻 1 号,是由江西省农业科学院选育的早稻品种,整个生育期为 110 d 左右。

1.2 试验设计

采用温室盆栽实验,共设置 6 个处理。两因素分别为淹水深度和氮肥类型。淹水深度为 3 cm (F1) 和

5 cm (F2), 氮肥类型为不施氮肥 (N1)、普通尿素 (N2) 和包膜尿素 (N3)。6 个处理分别为 F1N1、F1N2、F1N3、F2N1、F2N2 和 F2N3, 重复 4 次。种植桶高 26.8 cm, 直径 23.0 cm, 体积为 10 L。每桶装 3.5 kg 沙壤土, 基本理化性质为 pH 5.6, 有机质 24.2 g/kg, 速效钾 40 mg/kg, 有效氮 86 mg/kg, 有效磷 21.4 mg/kg。以尿素 (含 46.0% N) 作为氮肥, 过磷酸钙 (含 16.0% P_2O_5) 作为磷肥, 氯化钾 (含 60.0% K_2O) 作为钾肥。包膜尿素由山东金正大生态工程有限公司提供, 含氮量为 43.0%。包膜尿素和过磷酸钙作基肥一次性施用。普通尿素进行分次施用, 50% 为基肥, 20% 作分蘖肥, 30% 作穗肥。氯化钾分为 50% 的基肥和 50% 的穗肥。氮磷钾相当于 120 kg N/hm²、105 kg P_2O_5 /hm² 和 120 kg K_2O /hm² 的田间用量。水深保持在 3 cm 或 5 cm, 每天上午补足。水稻于 2021 年 4 月 15 日播种, 5 月 4 日移栽。采用三本插, 每桶移栽 1 丛。水稻移栽好后立即将大小相似的蝌蚪转移到种植桶中, 每桶 10 只。水稻于 7 月 23 日收获。

1.3 取样和测量

定期利用 10 mL 注射器在每个桶内采集 5 个点的水样混匀, 共计 50 mL。在实验室内, 水样过 0.45 μ m 的滤膜后, 采用电位法测定 pH 和紫外分光光度法测定硝态氮浓度^[11]。由于蝌蚪体型较小, 且颜色与土壤背景相似, 为了减少人为影响, 仅在第 7 天和 21 天时记录了存活蝌蚪数量。当前肢开始萌出时 (水稻移栽后第 21 天), 用尼龙网将蝌蚪全部捕获。并用吸水纸除去体表水后称重。待所有蝌蚪安乐死后浸泡在 10% 福尔马林溶液中, 并将每只蝌蚪放在白色带刻度硬纸上进行拍照。使用 ImageJ 软件计算蝌蚪的形态度量, 主要有体长 (TL, Total length)、尾巴宽度 (TW, Tail width)、口宽 (MW, Mouth width)、体宽 (BW, Body width)、眼间距 (DE, Distance between eyes) 和头体长 (SVL, Snout-vent length), 具体度量方法见《中国两栖动物彩色图鉴》^[23]。水稻收获时, 分为三部分: 稻谷、茎秆和叶片。所有样品均用去离子水清洗, 并在 105℃ 下杀青 20 min, 于 75℃ 下烘干 96 h 至恒重, 分别记为稻谷、茎秆和叶片生物量。

1.4 统计分析

存活率表示为每个桶中活的蝌蚪数量与最初投入的蝌蚪数量之间的百分比。所有数据使用 Microsoft Excel 2016 进行处理。采用双因素方差分析探究淹水深度和氮肥类型对蝌蚪存活率和水稻生物量的影响。统计分析前, 对所测量数据进行正态性和方差齐性检验; 若不满足, 则对数据进行相应变换处理。采用 Duncan 多重比较检验各指标在不同处理下的差异, 显著性水平为 0.05。以上统计分析均使用 GenStat 20.0 (VSN International Ltd.) 完成。

2 结果与分析

淹水深度对蝌蚪存活率和水稻生物量没有显著影响, 而氮肥类型对各指标均有显著影响 (表 1, $P \leq 0.05$)。此外, 淹水深度和氮肥类型的交互作用不显著 (表 1, $P > 0.05$)。

表 1 淹水深度和氮肥类型对蝌蚪存活率和水稻生物量的双因素方差分析结果

Table 1 Two-way ANOVA results for effects of flooding depth and N fertilizer on tadpole survival rate and rice biomass

指标 Index	淹水深度 Flooding depth $df=1$	氮肥类型 N fertilizer $df=2$	淹水深度×氮肥类型 Flooding depth×N fertilizer $df=2$
	<i>F</i>	<i>F</i>	<i>F</i>
第 7 天存活率 Survival rate on Day 7	6 ^{ns}	32.16 *	2.91 ^{ns}
第 21 天存活率 Survival rate on Day 21	4.08 ^{ns}	64.75 *	1.33 ^{ns}
茎秆生物量 Stem biomass	3.11 ^{ns}	84.81 *	0.96 ^{ns}
叶片生物量 Leaf biomass	0.13 ^{ns}	67.81 *	0.65 ^{ns}
稻谷生物量 Grain biomass	0.47 ^{ns}	43.59 *	0.34 ^{ns}
总生物量 Total biomass	0.03 ^{ns}	101.11 *	0.93 ^{ns}

ns 代表 $P > 0.05$; * 代表 $P \leq 0.05$

普通尿素作为分蘖肥的施用发生在插秧后的第 9 天。在水稻移栽后第 21 天进行蝌蚪采样, 此时某些个

体的前肢开始发育。图 1 展示了水稻移栽后第 7 天和第 21 天蝌蚪的存活率。第 7 天时不施氮肥处理的成活率最高,其中淹水 3 cm 处理的蝌蚪成活率超过 97.5%。在包膜尿素处理中,90.0%和 92.5%的蝌蚪存活。然而,只有 75.0%和 62.5%的蝌蚪存活于普通尿素的处理。到第 21 天时,普通尿素的施用导致大多数蝌蚪死亡,在两个淹水深度中的存活率分别为 10.0%和 15.0%。相比之下,不施氮肥处理中 92.5%的蝌蚪在 3 cm 淹水条件下存活,而在 5 cm 深度下的存活率较低(87.5%)。在 3 cm 淹水条件下包膜尿素处理的蝌蚪成活率为 82.5%,远高于 5 cm 淹水处理的 57.5%。

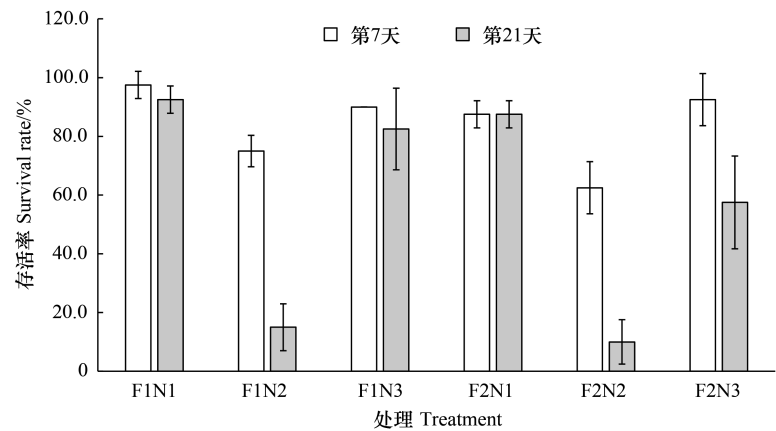


图 1 不同处理下蝌蚪在第 7 天和第 21 天的存活率

Fig.1 Tadpole survival rate under different treatments on Day 7 and Day 21

通过观察发现在不施氮肥的处理中,没有一只蝌蚪有后肢,而施氮处理中的一些个体后肢开始发育。氮肥处理的各项度量均高于不施氮肥处理(表 2)。F1N1 中蝌蚪的平均鲜重为 0.12 g,而施氮肥的蝌蚪约为 0.2 g。普通尿素处理的蝌蚪重量略高,可能是由于数量减少的缘故。不同处理的体宽和口宽相当。两种淹水深度的不施氮处理的田面水 pH 值接近,约为 6.0(图 2)。pH 值在水稻移栽前 12 d 下降,然后升高。施用氮肥后,田面水 pH 值高于不施氮处理,施氮处理与不施氮处理间的差距随移栽时间先增大后减小。普通尿素处理的 pH 值高于包膜尿素处理,但同一种氮肥的不同淹水处理之间没有显著差异。

表 2 不同处理下蝌蚪的形态度量

Table 2 Morphological measurement of tadpoles from different treatments

处理 Treatments	鲜重 Weight/g	体长 TL/cm	尾宽 TW/cm	头体长 SVL/cm	体宽 BW/cm	口宽 MW/cm	眼间距 DE/cm
F1N1	0.12±0.04b	2.07±0.34b	0.35±0.10b	0.84±0.12b	0.49±0.08a	0.16±0.03a	0.12±0.02c
F1N2	0.23±0.15a	2.64±0.70a	0.46±0.12a	0.94±0.21ab	0.49±0.13a	0.19±0.06a	0.15±0.03abc
F1N3	0.19±0.09ab	2.40±0.44a	0.38±0.12ab	0.96±0.17a	0.54±0.08a	0.17±0.05a	0.12±0.03bc
F2N1	0.16±0.05b	2.36±0.28a	0.36±0.06ab	0.92±0.10ab	0.50±0.06a	0.19±0.06a	0.14±0.02ab
F2N2	0.20±0.16ab	2.61±0.56a	0.44±0.25ab	0.94±0.28ab	0.50±0.17a	0.18±0.05a	0.17±0.04a
F2N3	0.18±0.12ab	2.49±0.54a	0.41±0.13ab	0.95±0.18a	0.51±0.11a	0.15±0.05a	0.13±0.03abc

表中数值均为平均值±标准差;同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)

在不施氮肥的处理中,田面水的硝态氮浓度先增加,然后降低到 1.0 mg/L(图 3)。与 5 cm 淹水深度处理相比,3 cm 淹水深度处理的硝态氮含量更高。移栽后 10 d 内,不同氮肥处理间的硝态氮含量差异不显著。在分蘖期追肥后,普通尿素处理中的硝态氮浓度增加,而包膜尿素处理只有微小的变化。

施氮处理的稻谷生物量要显著高于不施氮处理,但两种氮肥之间没有显著差异(表 3)。不施氮处理的稻谷生物量分别为 15.88 和 14.64 g/plant,约为施氮处理的一半。普通尿素处理的茎秆和叶片生物量要显著高于其他处理,但同种氮肥处理的不同淹水深度之间差异不显著(表 1 和 3)。

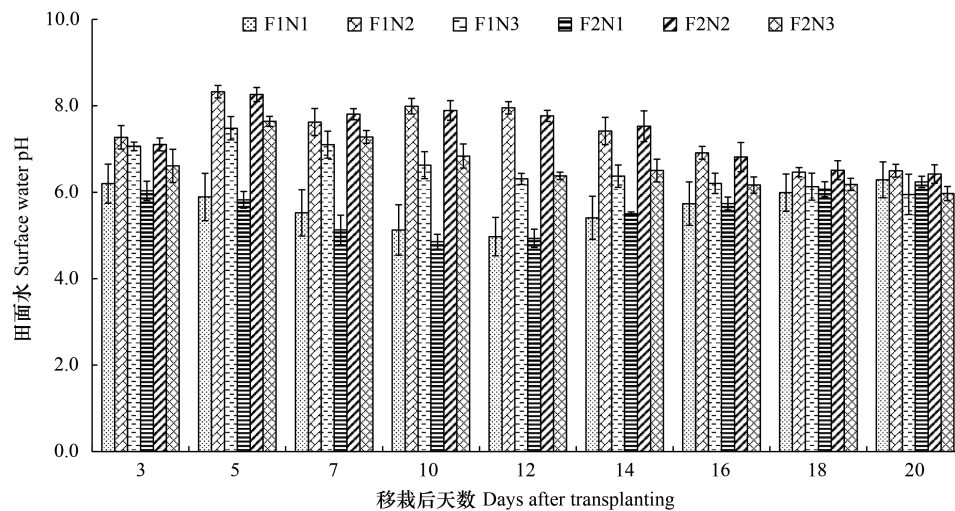


图 2 不同处理下田面水 pH 随时间的变化规律

Fig.2 Changes in surface water pH of different treatments with days after transplanting

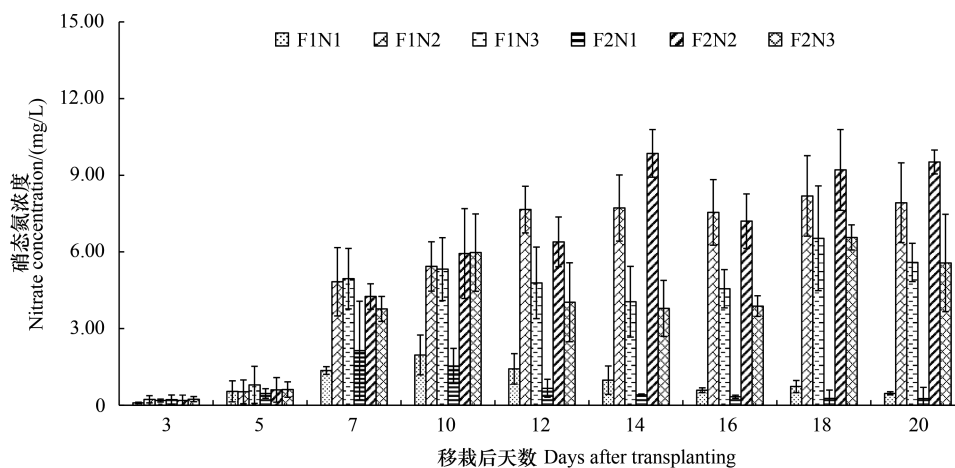


图 3 不同处理下田面水硝态氮浓度随时间的变化规律

Fig.3 Changes in surface water nitrate concentration of different treatments within days after transplanting

表 3 不同处理下水稻各部分生物量

Table 3 Biomass of different parts of rice in different treatments

处理 Treatments	茎秆生物量 Stem biomass/(g/plant)	叶片生物量 Leaf biomass/(g/plant)	稻谷生物量 Grain biomass/(g/plant)	总生物量 Total biomass/(g/plant)
F1N1	15.62c	5.26c	15.88b	36.75d
F1N2	26.60a	9.93a	30.12a	66.66a
F1N3	19.80b	6.84b	28.53a	55.17c
F2N1	17.23c	5.20c	14.64b	37.07d
F2N2	26.48a	9.72a	27.94a	64.14ab
F2N3	21.67b	7.47b	29.10a	58.24bc

同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

3 讨论

在农业活动中,施肥会对两栖动物的生长发育产生重大影响。虽然不施氮处理可以保证蝌蚪的生长不受影响,但会严重影响水稻产量。氮肥对水稻等农作物的生长不可或缺。以中国为例,每年氮肥的消耗量高达

630 万吨^[5]。近年来为了水稻的可持续生产,有研究建议不同地区应采用不同的氮肥用量以获得最佳产量^[5]。然而,目前大多数氮肥品种仍为速效氮肥,如尿素、碳酸氢铵和复合肥料等,这些肥料极易溶解,快速转化为铵态氮和硝态氮等^[11–12]。无机氮的增加会影响水体 pH^[19]。同时当无机氮以高浓度存在时,会对水生动物有害,特别是硝态氮。这些有害化学物质会影响蝌蚪的发育并增加异常个体,从而影响它们的游泳等活动能力,甚至会导致蝌蚪死亡^[8, 24–25]。本研究表明不同施肥处理的田面水 pH 和硝酸盐浓度存在显著差异,普通尿素处理的硝态氮浓度和田面水 pH 值均高于不施氮肥和包膜尿素处理。普通尿素处理部分采样点田面水 pH 甚至超过 8.0(图 2 和 3)。有研究表明蝌蚪尾部皮肤 ATP 酶和肝脏 GSH 酶活力会随着 pH 先升高后降低,而这个转折点在 7.5 左右^[26]。这些酶的活性涉及到蝌蚪的运动能力和代谢过程,进而影响其生长。包膜尿素一次性施用,逐渐释放氮素,以保持水中相对较低的硝态氮浓度,这和之前的田间实验的结论一致^[6, 14]。包膜尿素通过控释的方式对水稻生长和环境产生积极影响^[16, 27]。以往的研究较少关注到此类肥料对水生动物的影响。本研究表明包膜尿素处理可以维持水稻产量并保证蝌蚪有很高的存活率(约 70.0%),这对两栖动物保护是有益的。不过研究中发现施用普通尿素处理的要比包膜尿素处理的蝌蚪鲜重更高,这可能是施用普通尿素处理中的蝌蚪数量减少的缘故,密度越低,蝌蚪能获得的资源就更多^[28]。

两栖动物的繁殖几乎离不开水,部分树蛙科种类会在树叶上进行繁殖,而大部分类群的繁殖均在水中完成^[29–30]。同时水分管理也是水稻生产的重要方面。近年来随着农业生产技术的不断加强,农田灌溉可以得到精确调控。以往的田间试验表明,更深的田面水可以减少稻田氨挥发,增加水稻氮素利用率^[19]。考察其对两栖动物生长发育的影响将有助于进一步提高田间水分管理的生态学价值。本研究中,水位的不同并没有对蝌蚪存活率和生长产生显著性影响。在不施肥处理中,更深的田面水中蝌蚪要表现得更重更大,这与之前的研究类似^[20–21]。但在施肥处理中不一定成立,有些指标 3 cm 水深处理反而更大,比如鲜重(表 2)。在本研究中,两种淹水深度对各指标的影响并不显著,这可能与盆栽试验中水体积的相对差异较小有关。而在田间条件下,由于田块面积较大,水位的高低会显著影响水体的体积,进而会影响到养分浓度和 pH 等^[19]。

4 结论

综上所述,相比与普通尿素分次施肥,包膜尿素一次性施用可以提高泽陆蛙蝌蚪的存活率,并维持水稻产量。5 cm 田面水处理的蝌蚪各项度量指标均有所增加。本研究为农田氮肥施用和水分管理对蝌蚪发育的影响提供了基础资料,有助于水稻生产和两栖动物生长之间的平衡,对加强两栖动物物种保护有一定的意义。需要指出的是,本研究主要从形态度量学角度出发,今后拟利用更多的免疫学和分子生物学技术,从生理生态学角度来阐明两栖动物对包膜尿素响应的生理和分子机制。同时本文主要采用室内盆栽共培养的方法,与蝌蚪在稻田中的生长条件会存在差异,未来应从田块尺度进一步论证。

参考文献(References):

- [1] Stuart S N, Chanson J S, Cox N A, Young B E, Rodrigues A S L, Fischman D L, Waller R W. Status and trends of amphibian declines and extinctions worldwide. *Science*, 2004, 306(5702): 1783–1786.
- [2] Bundschuh M, Zubrod J P, Wernicke T, Kanschak M, Werner L, Brühl C A, Baudy P, Schulz R. Bottom-up effects of fungicides on tadpoles of the European common frog (*Rana temporaria*). *Ecology and Evolution*, 2021, 11(9): 4353–4365.
- [3] IUCN. The IUCN Red List of Threatened Species (version 2020-1) [EB/OL]. [2024-01-08]. <https://www.iucnredlist.org>.
- [4] Hanlon S M, Lynch K J, Kerby J L, Parris M J. The effects of a fungicide and chytrid fungus on anuran larvae in aquatic mesocosms. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(17): 12929–12940.
- [5] Cai S Y, Zhao X, Pittelkow C M, Fan M S, Zhang X, Yan X Y. Optimal nitrogen rate strategy for sustainable rice production in China. *Nature*, 2023, 615(7950): 73–79.
- [6] Dong Z Z, Wu L H, Chai J, Zhu Y H, Chen Y L, Zhu Y Z. Effects of nitrogen application rates on rice grain yield, nitrogen-use efficiency, and water quality in paddy field. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2015, 46(12): 1579–1594.
- [7] Wang M, Chai L H, Zhao H F, Wu M Y, Wang H Y. Effects of nitrate on metamorphosis, thyroid and iodothyronine deiodinases expression in

- Bufo gargarizans* larvae. Chemosphere, 2015, 139: 402-409.
- [8] Garriga N, Montori A, Llorente G A. Impact of ammonium nitrate and sodium nitrate on tadpoles of *Alytes obstetricans*. Ecotoxicology, 2017, 26 (5): 667-674.
- [9] Babini M S, de Lourdes Bionda C, Salas N E, Martino A L. Adverse effect of agroecosystem pond water on biological endpoints of common toad (*Rhinella arenarum*) tadpoles. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(8): 459.
- [10] 王懿, 李丕鹏, 陆宇燕, 代辰飞, 王勇, 杨皓月, 马媛媛. 复合肥对花背蟾蝌蚪红细胞微核及核异常的影响. 生态学杂志, 2011, 30 (12): 2843-2848.
- [11] Zhu Z L, Wen Q X, Freney J R. Nitrogen in Soils of China. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997: 239-279.
- [12] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China-Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(2): 117-127.
- [13] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, Yang J C, Zou Y B, Zhong X H, Wang G H, Zhang F S. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China. Field Crops Research, 2006, 96(1): 37-47.
- [14] Yang Y C, Zhang M, Li Y C, Fan X H, Geng Y Q. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, activities of leaf enzymes, and rice yield. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(6): 2307-2317.
- [15] Shaviv A, Raban S, Zaidel E. Modeling controlled nutrient release from polymer coated fertilizers: diffusion release from single granules. Environmental Science & Technology, 2003, 37(10): 2251-2256.
- [16] Li P F, Lu J W, Wang Y, Wang S, Hussain S, Ren T, Cong R H, Li X K. Nitrogen losses, use efficiency, and productivity of early rice under controlled-release urea. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 251: 78-87.
- [17] Ye Y S, Liang X Q, Chen Y X, Liu J, Gu J T, Guo R, Li L. Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use. Field Crops Research, 2013, 144: 212-224.
- [18] Naito R, Yamasaki M, Imanishi A, Natuhara Y, Morimoto Y. Effects of water management, connectivity, and surrounding land use on habitat use by frogs in rice paddies in Japan. Zoological Science, 2012, 29(9): 577-584.
- [19] Yang Y, Li N, Ni X Y, Yu L X, Yang Y, Wang Q, Liu J, Ye Y F, Tao L Z, Liu B M, Wu Y J. Combining deep flooding and slow-release urea to reduce ammonia emission from rice fields. Journal of Cleaner Production, 2020, 244: 118745.
- [20] 唐小芬, 樊晓丽, 林植华, 姚婷婷, 李香, 金晶, 周存通. 浙江丽水中华大蟾蜍和黑眶蟾蜍蝌蚪对水位变化的表型响应. 生态学报, 2015, 35(3): 911-918.
- [21] 伍亮, 高歌, 史爽, 李龙萱, 彭秀娟, 李文慧, 王 萍, 张志强. 水位变化影响蝌蚪存活、形态表型和植物血凝素反应. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3427-3432.
- [22] Gosner K L. A simplified table for staging anuran embryos and larvae with notes on identification. Herpetologica, 1960, 16(3): 183-190.
- [23] 费梁, 叶昌媛, 江建平. 中国两栖动物彩色图鉴. 成都: 四川科学技术出版社, 2010.
- [24] Yang X, Liu H B, Mao X T, Deng J L, Haefele S M. Non-flooding rice yield response to straw biochar and controlled-release fertilizer. Agronomy Journal, 2020, 112(6): 4799-4809.
- [25] Krishnamurthy S V, Smith G R. Growth, abnormalities, and mortality of tadpoles of American toad exposed to combinations of malathion and nitrate. Environmental Toxicology and Chemistry, 2010, 29(12): 2777-2782.
- [26] Spolyarich N, Hyne R V, Wilson S P, Palmer C G, Byrne M. Morphological abnormalities in frogs from a rice-growing region in NSW, Australia, with investigations into pesticide exposure. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 173(1/2/3/4): 397-407.
- [27] 刘哲宇, 申屠琰, 杨程, 朱卫东, 王志铮. 棘胸蛙蝌蚪尾部皮肤和肝脏对 pH 急性胁迫及恢复的抗氧化应答特征. 浙江海洋大学学报: 自然科学版, 2021, 40(1): 29-34.
- [28] Huang Q Y, Fan X L, Tang S H, Zhang M, Huang X, Yi Q, Pang Y W, Huang J F. Seasonal differences in N release dynamic of controlled-released urea in paddy field and its impact on the growth of rice under double rice cropping system. Soil and Tillage Research, 2019, 195: 104371.
- [29] 谢文华, 陶双伦, 杨冬梅, 梁静, 李俊年. 密度对大树蛙蝌蚪生长发育和存活率的影响. 生态学报, 2014, 34(22): 6583-6588.
- [30] 李成, 戴强, 王跃招, 顾海军. 四川无尾两栖类的繁殖模式. 生物多样性, 2005, 13(4): 290-297.