

张旭东, 刘波, 张丹, 等. 稻田常见杂草种子出苗对水深变化的差异化响应[J]. 土壤与作物, 2025, 14(3): 295–304.

ZHANG X D, LIU B, ZHANG D, et al. Differential response of seedling emergence from common weeds in paddy field to water depth variations[J]. Soils and Crops, 2025, 14(3): 295–304.

稻田常见杂草种子出苗对水深变化的差异化响应

张旭东^{1,2}, 刘波¹, 张丹², 张文广¹, 潘媛¹, 郑皓文¹, 李蕊¹, 严硕¹, 申敏琰¹, 赖明子¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102;

2. 长春大学, 吉林 长春 130022)

摘要: 杂草与水稻竞争水分、养分和光照等资源, 降低水稻的产量。稻田杂草管理的生态防控措施是当前研究的热点。植物出苗期对环境变化更为敏感, 是杂草防控的关键阶段。水分管理是限制杂草种苗更新的重要措施。然而, 关于不同水深及间歇性淹-退水处理对稻田杂草出苗影响的研究, 特别是在中国三江平原等重要稻作区, 仍相对缺乏。本文研究了不同水深梯度 (0、3、6、9 和 12 cm) 及淹-退水交替处理, 对稗 (*Echinochloa crus-galli*)、无芒稗 (*Echinochloa crus-galli* var. *mitis*)、鬼针草 (*Bidens pilosa*) 和泽泻 (*Alisma plantago-aquatica*) 4 种常见稻田杂草种子出苗的影响。结果显示, 不同物种对水深变化的响应存在差异, 稗、无芒稗和鬼针草的种子在 12 cm 水深条件下, 出苗率分别降低了 27.6%, 36.4% 和 44.8%。然而, 泽泻对水生环境具有高度适应性, 在较深水环境中仍能保持 80% 以上的出苗率; 与持续淹水相比, 稗的种子出苗率在淹-退水处理下变化不大, 泽泻的种子出苗率甚至下降了 47.9%~84.5%, 说明短期退水也能在一定程度上抑制该类杂草种子的出苗。研究结果为稻田不同类型杂草的生态防控策略选择提供了科学依据。

关键词: 杂草控制; 水深管理; 出苗率; 生态防控策略

中图分类号: S511

文献标识码: A

Differential response of seedling emergence from common weeds in paddy field to water depth variations

ZHANG Xudong^{1,2}, LIU Bo¹, ZHANG Dan², ZHANG Wenguang¹, PAN Yuan¹, ZHENG Haowen¹, LI Rui¹, YAN Shuo¹, SHEN Minyan¹, LAI Mingzi¹

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China;

2. Changchun University, Changchun 130022, China)

Abstract: Weeds compete with rice plant for resources such as water, nutrients, light, and weed competition has become one of the key factors in reducing rice yields. The ecological control measures of weed management in paddy field have become the focus of current research. The seedling stage of plants is more sensitive to environmental changes, which is the key stage of weed control. However, studies on the effects of different water depths and intermittent flooding and drying treatments on weed seedling emergence, particularly in important rice-growing areas such as the Sanjiang Plain in China, remain relatively scarce. This study investigated the influence of different water depth gradients (0, 3, 6, 9, 12 cm) and alternating flooding-drying treatments on the emergence of four common paddy field weed species: *Echinochloa crus-galli*, *E. crus-galli* var. *mitis*, *Bidens pilosa*, and *Alisma plantago-aquatica*. The results demonstrate a significant interspecific divergence in seed emergence responses to hydrological regimes. Compared to control conditions, 12 cm water depth induces emergence reductions by 27.6%, 36.4% and 44.8% in *Echinochloa crus-galli*, *E. crus-galli* var. *mitis*, and *Bidens pilosa*, respectively. In contrast, *A. plantago-aquatica* maintains over 80% emergence under deepwater conditions, demonstrating superior aquatic adaptation. Notably, *E. crus-galli* shows no significant difference in emergence between continuous flooding and alternating flooding-draining treatments, whereas emergence rate in *A. plantago-aquatica*

收稿日期: 2025-01-10; 修回日期: 2025-03-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771108); 科技基础资源调查专项项目 (2021FY100401).

第一作者简介: 张旭东 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为农田杂草生态防治. E-mail: 221201415@mails.ccu.edu.cn.

通信作者: 刘波 (1982-), 高级工程师, 主要从事农田植物多样性、土壤种子库方面的研究. E-mail: liubo@jga.ac.cn.

declines sharply by 47.9% - 84.5%. These results indicate that short-term water withdrawal can also inhibit the emergence of weed seeds to a certain extent. This study provides scientific basis for the selection of ecological control strategies for different type of weeds in rice fields.

Keywords: weed control; water depth management; emergence rate; ecological control strategies

0 引言

水稻是全球最重要的粮食作物之一,其生产过程中面临着多种生物和非生物的胁迫,其中杂草竞争是影响水稻产量的关键因素之一^[1-2]。在稻田环境中,杂草与水稻争夺水分、养分和光照,导致水稻的生长受到抑制,最终产量降低^[3]。传统的杂草控制方法包括化学除草剂、人工拔草等,但这些方法存在成本高、环境污染和杂草抗药性等问题^[4]。因此,寻找有效的生态防控方法成为稻田管理的重要议题之一。

水分管理是控制稻田杂草的重要手段之一^[5]。陆强等^[6]的研究表明,水稻播种后保持浅水至30天,千金子(*Leptochloa chinensis*)的发生量减少了35.0%~77.1%。Bhagat等^[7]的研究也表明,水稻种植后最初几周的淹水可以有效抑制杂草的生长,抑制效果因水深、杂草种类和淹水时长而异。淹水对杂草种子出苗的显著影响,主要通过改变种子所处的土壤环境、氧气供应和水分可用性来实现。许多植物种子的出苗过程需要充足的氧气保障,长期淹水会使这些种子的呼吸作用受到抑制。例如,随着O₂浓度从20.9%降低到2.5%,甘蓝(*Brassica oleracea*)的出苗率持续下降^[8]。因此,在稻田管理中,通过持续淹水可以有效减少某些杂草的出现,从而减少对水稻的竞争。

当前,水资源短缺问题日益严峻,尤其在水稻种植过程中,水稻苗期可能由于水资源供应不足而出现间歇性退水的现象^[9]。间歇性退水会导致土壤中氧气和水分条件的周期性变化。干湿交替条件下,土壤中的氧气含量迅速增加,使得种子的呼吸作用得以恢复,可在一定程度上调节水稻根系周围的土壤水分和氧气的平衡^[10]。Bouma等^[11]认为,干旱后再湿润,水分会填充土壤空隙,进而阻碍气体扩散,抑制土壤呼吸;淹水胁迫通过增强无氧呼吸和损害糖代谢以及植物激素的生物合成,来降低种子的出苗。对于大部分陆生植物来说,淹水都会对其物种的更新产生影响,包括种子发芽、幼苗建立、繁殖生长等过程^[12]。例如,木豆(*Cajanus cajan*)在淹水3~6天后,就会失去发芽能力^[13]。然而,不同类型植物对间歇性淹水的响应可能不同。王欣^[14]的研究结果表明,短期的水淹处理能打破稗(*Echinochloa crus-galli*)、金色狗尾草(*Setaria glauca*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)和荇草(*Arthraxon hispidus*)种子的休眠,提高种子出苗率^[15]。在全球气候变化背景下,水资源日趋紧张,研究间歇性退水对杂草种苗更新的影响具有重要的现实意义。通过深入探讨淹—退水的动态变化对杂草种子出苗的作用机制,可以为杂草的生态防控提供更为科学的数据基础,也有助于提高区域水资源的利用效率。

三江平原位于东北平原的东北部,是我国重要的商品粮基地和粮食战略储备基地^[16]。水稻是三江平原的主要农作物之一,稻田总面积约为266.7万hm²,占该地区粮食作物播种面积的33%^[17-18]。目前关于该区域稻田常见杂草及其生态生物学特征的研究鲜有报道,制约了该区域稻田生态防控策略的选择。本研究选取该区稻田最常见的几种杂草,开展水深变化对种苗更新的影响研究。本研究的假设:(1)较高的水深能够有效抑制杂草种子的出苗;(2)短期退水处理同样可以达到与持续淹水类似的抑制效果。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

本研究基于在三江平原稻田野外调查的结果,选取4种常见杂草—稗、无芒稗(*Echinochloa crus-galli* var. *mitis*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)和泽泻(*Alisma plantago-aquatica*)开展试验。种子采集于三江平原腹地—黑龙江省抚远市(47°44'N~48°08'N, 134°04'E~134°36'E),于2023年8月在稻田中采集。种子采集后,手动清理去除杂质,随后将种子风干,并在4℃下冷藏保存,直至实验播种时使用。

在播种前, 将种子放入 0.5% 高锰酸钾 (K_2MnO_4) 溶液中浸泡 30 分钟; 然后, 用蒸馏水清洗几遍, 直至将残留高锰酸钾溶液清洗掉。为保证实验结果的可比性, 仅选用大小和形态相似的成熟种子进行后续处理。

1.2 试验设计

1.2.1 不同水深对种子出苗的影响

为探究不同水深条件对杂草种子出苗的影响, 设置 5 个水深梯度, 分别为 0、3、6、9、12 cm。每个水深梯度处理设置 5 次重复, 4 个物种共计 100 个培养杯。实验在人工气候箱 (HPG-280HX, 哈尔滨市东联电子技术开发有限公司) 进行, 培养箱设置的光温条件为光照 12 h/25 °C 和黑暗 12 h/15 °C, 光照强度为 4 000 Lx, 以模拟实际稻田条件。每个培养杯的直径为 8 cm, 高度为 18 cm, 底部铺设 3 cm 厚的细沙作为基础层。每个杯中, 均匀播种 50 粒种子, 种子覆盖 0.5 cm 的细沙。实验过程中, 定期补充水分, 确保实验所需水深, 每隔 1 天观察记录种子的出苗情况。种苗钻出沙土层即为成功出苗, 连续 2 周没有新种子出苗视为实验结束。

1.2.2 淹-退水对种子出苗的影响

为进一步探讨淹水与退水历时对杂草种子出苗的影响, 设计了不同的淹水与退水组合实验; 淹水时间分为短期 (2 d)、中期 (4 d) 和长期 (8 d), 退水时间也分为 2 d、4 d 和 8 d, 共 9 个试验组 (表 1)。每个试验组设置 5 次重复, 4 个物种共计 180 个培养杯。最高淹水深度为 6 cm, 定期监测每个杯子的水深, 并根据需要进行调整, 以保持所需的水深条件。其他培养条件和观察记录与 1.2.1 相同。

表 1 淹-退水试验设置
Table 1 Setting of waterlogging-recession test

| 淹水处理 Inundation treatment | 试验组 Experimental group | 淹水历时 Inundation duration/d | 退水历时 Recession duration/d |
|--|---------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 短期淹水处理 Short-term flooding treatment | 2-2 | 2 | 2 |
| | 2-4 | 2 | 4 |
| | 2-8 | 2 | 8 |
| 中期淹水处理 Medium-term flooding treatment | 4-2 | 4 | 2 |
| | 4-4 | 4 | 4 |
| | 4-8 | 4 | 8 |
| 长期淹水处理 Long-term flooding treatment | 8-2 | 8 | 2 |
| | 8-4 | 8 | 4 |
| | 8-8 | 8 | 8 |

1.2.3 数据采集与处理

本实验主要测量以下参数: 平均发芽时间 (MGT) 用于计算种子的平均发芽时间, 表示种子从播种到发芽所需时间的平均值^[19]。

$$MGT = \frac{\sum(n_i \times t_i)}{\sum n_i} \quad (1)$$

式中: n_i 是在第 i 天发芽种子数量; t_i 是从播种到第 i 天的时间。

发芽指数 (GI): 用于评估种子的发芽速度和活力^[20]。

$$GI = \sum \frac{n_i}{t_i} \quad (2)$$

式中: n_i 是在第 i 天发芽种子数量; t_i 是从播种到第 i 天的时间。

发芽势 (GP): 用于评估种子在特定时间内的发芽情况, 通常反映种子的发芽活力和早期发芽能力。

$$GP(\%) = \frac{N_i}{N} \times 100 \quad (3)$$

式中： M_t 是在规定时间（从播种到种子发芽数量最高那天）发芽的种子数量； N 是播种的种子总数量^[21]。

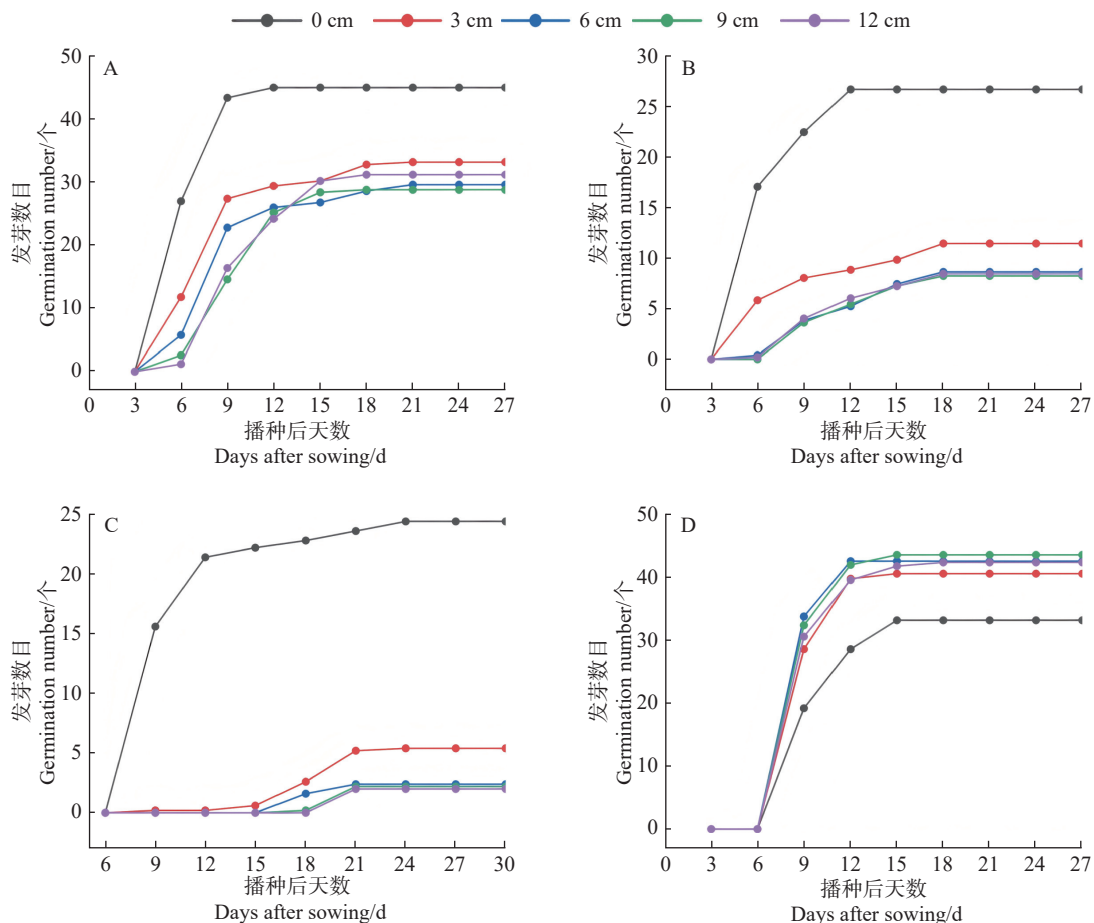
所有实验数据均使用 Origin 2024 和 PyCharm 2 024.1.3 进行数据处理和图表绘制。采用 SPSS Statistics 27 进行统计分析，使用单因素方差分析（ANOVA）和最小显著差异（LSD）法比较不同处理之间的显著性差异，显著性水平设定为 $P < 0.05$ 。

2 结果分析

2.1 不同水深对杂草种子出苗的影响

2.1.1 种子出苗率

由图 1 可以看出，稗和无芒稗种子的出苗时间较早，分别在播种后第 4 天和第 5 天开始出苗，且大多数处理在播种后第 12 天达到出苗高峰。泽泻种子则在播种后第 7 天开始出苗，并于第 13 天达到出苗高峰。相比之下，鬼针草的出苗情况较为特殊。在 0 cm 水深条件下，鬼针草的出苗始于播种后第 11 天，并在第 13 天达到出苗高峰；然而，在其他水深处理条件下，其出苗显著延迟，直至播种后第 18 天才开始出苗，且随后出苗数量较为稀少。



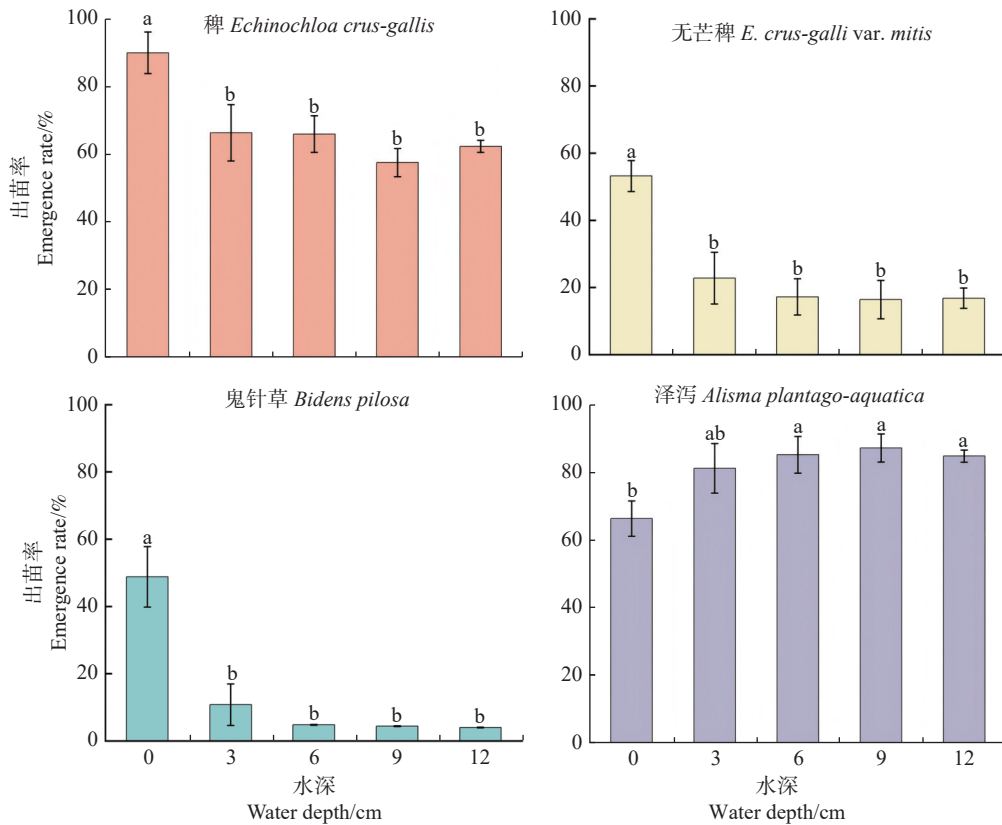
注：A：稗；B：无芒稗；C：鬼针草；D：泽泻。

Note: A: *Echinochloa crus-gallis*; B: *E. crus-galli* var. *mitis*; C: *Bidens pilosa*; D: *Alisma plantago-aquatica*.

图 1 四种杂草种子在不同水深下的累积出苗曲线

Fig. 1 Cumulative emergence curves of four weed seeds at different water depths

由图 2 可以看出，水深变化对 4 种杂草种子的出苗率有显著影响。稗、无芒稗和鬼针草的出苗率均在 0 cm 水深达到最高；稗的出苗率在 0 cm 水深高达 90%，当水深达到 9 cm 和 12 cm 时，出苗率明显降低，分别比 0 cm 水深显著低 32.4% 和 27.6% ($P < 0.05$)；无芒稗的出苗率在 0 cm 水深时为 53.2%，在 12 cm



注: 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

图2 四种杂草种子在不同水深下的出苗率

Fig. 2 Emergence rate of four weed seeds at different water depths

时降至最低 (16.8%); 鬼针草在 0 cm 水深为 48.8%, 是 12 cm 水深的 12.2 倍。泽泻的出苗率在 0 cm 水深最低 (66.4%), 在 3~12 cm 的水深范围内, 出苗率均在 80% 以上。

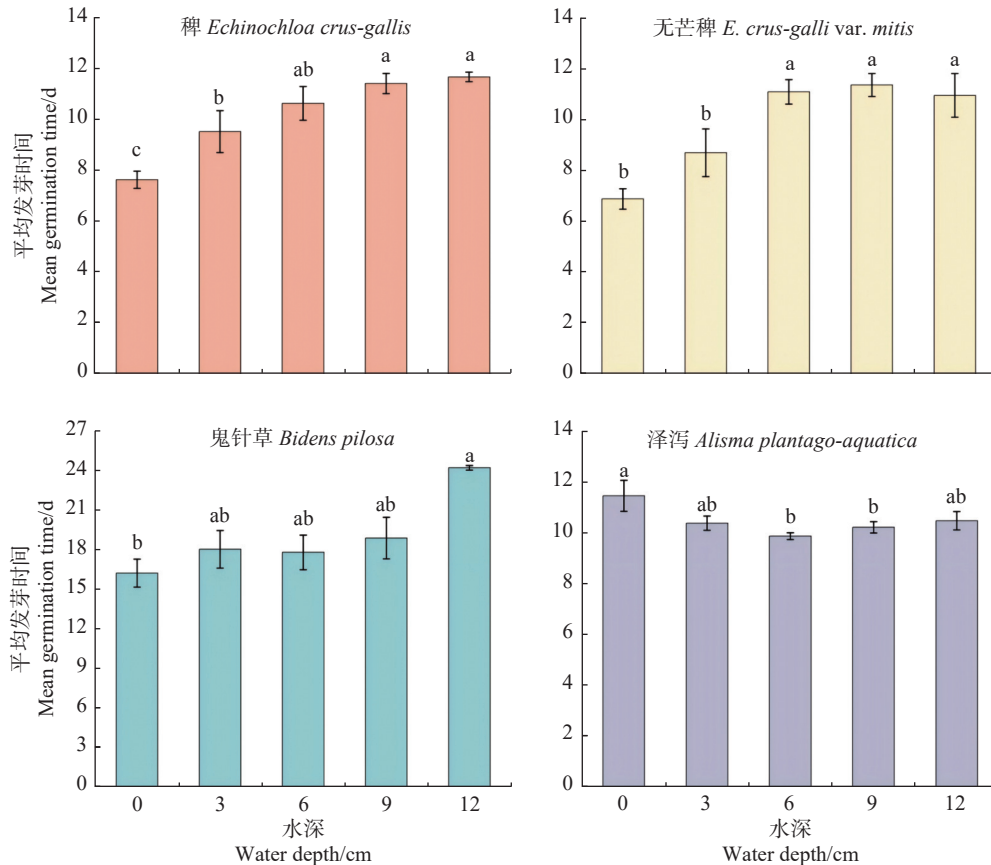
2.1.2 平均发芽时间 (MGT)

由图 3 可以看出, 稗的平均发芽时间随着水深的升高而逐渐延长, 在 0 cm 水深时, 平均发芽时间最低为 6.48 天), 在 12 cm 水深时, 平均发芽时间达到最大值 9.9 天。无芒稗的平均发芽时间与稗类似, 在 0 cm 水深时最低为 6.79 天, 随着水深的升高, 在 9 cm 水深时达到最高值 11.2 天。鬼针草的平均发芽时间在 0 cm 水深时最低为 15.47 天, 随着水深的增加, 平均发芽时间在 3 cm、6 cm 和 9 cm 之间无明显差异, 但在 12 cm 水深时显著提高至 23.1 天 ($P < 0.05$), 表明鬼针草对高水深极为敏感。泽泻各水深之间的平均发芽时间总体差异较小, 在 0 cm 水深时最高为 9.84 天, 仅比最低的 6 cm 水深多 1.36 天。

2.1.3 发芽指数 (GI) 和发芽势 (GP)

由表 2 可以看出, 稗在 0 cm 水深下的发芽指数显著高于其他水深 (约为 7.20); 随着水深的增加, 发芽指数逐渐下降, 在 12 cm 水深时最低 (约为 3.40)。无芒稗在 0 cm 水深时发芽指数最高, 约为 4.39; 随着水深的升高, 发芽指数显著下降 ($P < 0.05$), 在 6 cm 及以上水深时均降低至 1 以下, 说明高水深严重影响无芒稗的发芽表现。鬼针草对水深变化更为敏感, 其发芽指数在 0 cm 水深时最高仅为 1.96, 在 3 cm 及以上水深时迅速降至接近 0。相比之下, 泽泻对水深变化的适应性较强, 在 0 cm 水深时, 泽泻的发芽指数较低 (约为 3.62); 而在 3 cm 至 12 cm 的水深范围内发芽指数变化差异不明显。

由表 2 可以看出, 稗在 0 cm 水深时的发芽势最高 (60.4%), 在 6 cm 及以上水深时显著降低, 至 9 cm 水深时为 23.2%。无芒稗在 0 cm 水深时发芽势为 32.8%, 在 3 cm 及更高水深时显著降低 ($P < 0.05$),



注：不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

图 3 四种杂草种子在不同水深下的平均发芽天数

Fig. 3 Mean germination days of four weed seeds at different water depths

表 2 四种杂草种子在不同水深下的发芽指数和发芽势

Table 2 Germination index and germination potential of four weed seeds at different water depths

| 水深 Water depth/cm | 稗 <i>Echinochloa crus-gallis</i> | | 无芒稗 <i>E. crus-galli var. mitis</i> | | 鬼针草 <i>Bidens pilosa</i> | | 泽泻 <i>Alisma plantago-aquatica</i> | |
|-------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| | 发芽指数 Germination index | 发芽势 Germination potential/% | 发芽指数 Germination index | 发芽势 Germination potential/% | 发芽指数 Germination index | 发芽势 Germination potential/% | 发芽指数 Germination index | 发芽势 Germination potential/% |
| 0 | 7.20±0.26 a | 60.4±3.76 a | 4.39±0.40 a | 32.8±4.84 a | 1.96±0.11 a | 32.8±6.67 a | 3.62±0.40 b | 35.6±5.80 b |
| 3 | 4.65±0.38 b | 41.2±9.37 ab | 1.66±0.30 b | 16.0±4.60 b | 0.26±0.09 b | 5.62±2.79 b | 4.72±0.44 ab | 41.2±3.88 ab |
| 6 | 3.74±0.52 bc | 36.0±7.16 b | 0.85±0.10 c | 7.22±1.02 bc | 0.11±0.05 b | 4.00±1.27 b | 5.15±0.20 a | 55.2±2.94 a |
| 9 | 3.17±0.18 c | 23.2±3.72 b | 0.80±0.13 c | 5.24±1.02 c | 0.10±0.03 b | 2.00±0.63 b | 5.11±0.22 a | 42.0±5.25 ab |
| 12 | 3.40±0.10 c | 27.6±6.79 b | 0.85±0.08 c | 8.00±1.67 bc | 0.09±0.01 b | 3.63±0.40 b | 4.90±0.18 ab | 38.0±3.63 b |

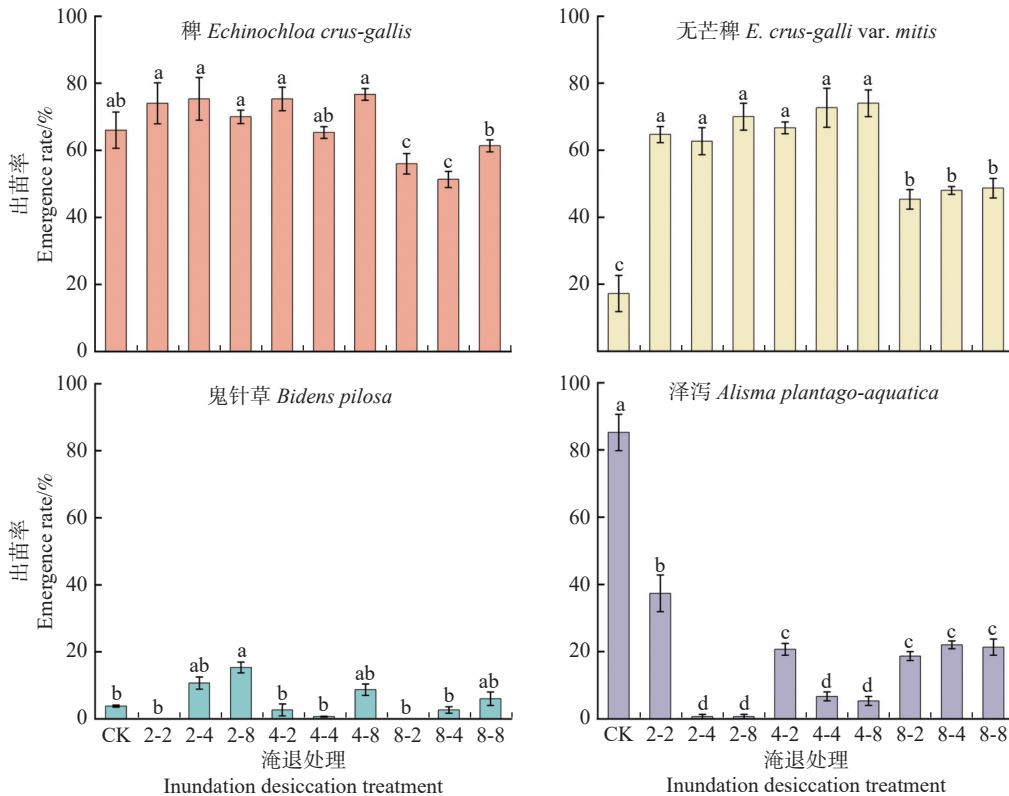
注：不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

发芽势在 9 cm 水深仅为 0 cm 水深的 1/6。鬼针草的发芽势在 0 cm 水深时较高 (32.8%)，但在 3 cm 水深及以上时迅速降至接近 0。泽泻的发芽势在 0 cm 水深时较低 (35.6%)，在 6 cm 水深时最高 (55.2%)，但在更高水深下略有下降。

2.2 不同淹退历时对杂草种子出苗的影响

由图 4 可以看出, 稗的出苗率在短期和中期淹水处理与对照差异不明显, 而长期淹水处理下出苗率显著低于对照。无芒稗的出苗率在所有淹退处理中均显著高于对照; 尤其是中短期淹水处理, 出苗率为对照的 4 倍。鬼针草的出苗率普遍较低, 所有处理下的出苗率均未超过 20%; 整体上, 随着退水时间的延长, 鬼针草的出苗率有增加的趋势, 与淹水时间关系不大。泽泻在所有处理下的出苗率均显著低于对照; 中短期淹水时, 随着退水时间延长, 出苗率进一步降低; 淹水时间为 8 天时, 不同退水处理对出苗率影响不大。



注: 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

图 4 四种杂草种子在不同淹退历时下的出苗率

Fig. 4 Seedling emergence rate of four weed seeds under different inundation and recession treatments

3 讨 论

3.1 不同水深对杂草种子出苗的影响

水深是影响稻田杂草种子出苗的重要环境因素^[22]。本研究表明, 稗、无芒稗和鬼针草在 0 cm 水深下的出苗率显著高于较深水位; 随着水深增加, 出苗率显著下降, 符合假设 1。Liu 等^[23]的研究表明, 0 cm 水深有利于长芒稗的生长, 而 10 cm 和 20 cm 水深显著抑制其生长。Kato 等^[24]的研究表明, 鬼针草的种子依赖充足的氧气供应才能顺利萌发, 而淹水会减少土壤中的氧气供应, 导致萌发率显著降低。浅水环境提供了更适宜这些陆生杂草种子出苗的条件^[25], 而随着水深增加, 水淹导致的低氧条件阻碍了种子正常代谢活动, 从而抑制了出苗^[26]。这种对水分条件的高度敏感性使得这类杂草并不适合在长期淹水的环境中生长, 也限制了其在水田等湿地环境中的生态位。

尽管稗在持续淹水环境的出苗率有所下降, 但仍能保持 60% 左右的出苗率 (图 2)。Turra 等^[27]的研究也表明, 稗能够适应多样化的水分条件; 作为水田环境中常见的杂草, 部分种子能够在低氧条件下正常

萌发^[28],说明仅通过淹水并不能完全抑制该类杂草的发生。与其他3个物种不同,泽泻的种子在3 cm或12 cm的淹水环境下出苗率更高,达80%以上。Moravcova等^[29]的研究也表明,泽泻能够在水淹条件下表现出较高的出苗率,这与泽泻作为典型水生植物的适应性相符^[30]。可见,不同物种种子的出苗对水深变化的响应存在差异。

水深变化对杂草种子的发芽特性也有影响。稗,无芒稗和鬼针草在0 cm水深下的发芽指数和发芽势较高,且平均发芽时间最短,表明在水分饱和状态下,这些杂草不仅出苗率高,发芽速度快,且种子活力强。随着水深增加,发芽指数和发芽势明显下降,平均发芽时间则逐渐延长,特别是在12 cm水深下,种子的出苗受到显著抑制。这一现象与Badalzadeh等^[31]关于小葵子(*Guizotia abyssinica*)的研究发现相似。水分饱和或低水深可能会打破种子休眠,提高种子活力,从而促进其出苗^[14]。当种子处于淹水状态时,种子受到低氧、低光照等环境压力,正常代谢被抑制,导致种子发芽速度减慢,甚至影响存活^[32-34]。泽泻在不同水深下的发芽指数和发芽势波动较小,平均发芽时间也相对稳定,表明其种子在较宽水深范围内保持较强的发芽能力。泽泻可能成为水稻生长初期的强竞争性杂草,因此除控制水深外,还需采取其他措施。

3.2 淹-退水对杂草种子出苗的影响

不同物种对淹退历时的响应有明显差异。本研究发现,稗的出苗率在短期和中期淹-退水处理下降了13.3%~24.7%,与持续淹水处理差异不显著。Ogorek等^[35]的研究也表明稗种子在持续4天的淹水后出苗率从96%降低至63%。另外,西来稗(*Echinochloa crus-galli* var. *zelayensis*)在持续4天6 cm的淹水条件下,出苗率就开始降低^[36]。这与我们的假设2相符,短期的退水也能在一定程度上起到抑制稗种子出苗的效果。这可能是因为本研究短期淹-退水试验设置超过了稗种子出苗的耐淹水临界值,导致稗的出苗受到抑制。

无芒稗和鬼针草更适应间歇性的水位波动,光头稗(*Echinochloa colona*)也具备在短期和中期淹水环境中生存的能力^[37],说明干湿交替的环境并不会阻止其生存,其生态位更倾向于短期或中期淹水的环境。无芒稗和鬼针草在持续淹水条件下的出苗率显著下降,表明这些杂草对长期淹水胁迫更敏感,持续淹水可能导致氧气供应不足,进而影响种子呼吸代谢,抑制其出苗^[38-41]。

泽泻在持续淹水条件下出苗率较高,但在淹-退水处理中出苗率显著下降,这表明泽泻更依赖稳定的水淹环境,水分缺乏可能抑制其种子的发芽^[31]。韩祯等^[42]的研究表明,一定时间的持续淹水,是保障湿地植被生长的必要条件。这揭示了泽泻在湿地和水淹环境中的生态优势,同时也表明干旱胁迫可能是限制其扩散的潜在因素。总之,不同物种对水深和淹-退水的响应差异提示我们在稻田杂草管理中,应根据物种的生态生物学特性,采取相应的防控策略以有效控制杂草。

4 结 论

水深是影响稻田杂草种子出苗的重要因素。稗、无芒稗和鬼针草在浅水环境中的出苗率较高,随着水深增加出苗率显著下降;而泽泻种子在较深水位下仍保持较高出苗率。不同水深条件对杂草的发芽指数、发芽势和平均发芽时间具有显著影响。淹-退水处理显著影响杂草的出苗率,但不同物种的响应各不相同;与持续淹水相比,稗的种子出苗率在淹-退水处理下变化不大,泽泻的种子出苗率甚至大幅下降,说明短期退水也能在一定程度上抑制部分杂草种子的出苗。

参考文献 (References):

- [1] 袁隆平,唐传道. 杂交水稻选育的回顾、现状与展望[J]. 中国稻米, 1999, 5(4): 3-6.
YUAN L P, TANG C D. Review, present situation and prospect of hybrid rice breeding[J]. China Rice, 1999, 5(4): 3-6.
- [2] XU L, LI X X, WANG X Y, et al. Comparing the grain yields of direct-seeded and transplanted rice: a meta-analysis[J]. Agronomy, 2019, 9(11): 767.

- [3] 杨永刚, 袁晓娟, 曹云, 等. 品种和播种量互作对机械旱直播水稻与杂草养分竞争的影响 [J]. 中国水稻科学, 2024, 38(2): 185–197.
YANG Y G, YUAN X J, CAO Y, et al. Effects of variety and seeding rate interaction on nutrient competition between mechanized dry direct seeded rice and weeds[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2024, 38(2): 185–197.
- [4] 朱新云, 施慎年, 吴佳文. 水稻旱直播田 47% 氯吡·丙·异可湿性粉剂除草效果及安全性 [J]. 杂草学报, 2016, 34(4): 39–42.
ZHU X Y, SHI S N, WU J W. Efficacy and selectivity of halosulfuron-methyl·pretilachlor·isoproturon 47% WP in dry seeded rice fields[J]. Journal of Weed Science, 2016, 34(4): 39–42.
- [5] 赵玉信, 杨惠敏. 作物格局、土壤耕作和水肥管理对农田杂草发生的影响及其调控机制 [J]. 草业学报, 2015, 24(8): 199–210.
ZHAO Y X, YANG H M. Effects of crop pattern, tillage practice and water and fertilizer management on weeds and their control mechanisms[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(8): 199–210.
- [6] 陆强, 朱小峰, 严引芬. 直播稻田水浆管理对杂草发生与控制作用研究 [J]. 杂草科学, 2010, 28(2): 41–43.
LU Q, ZHU X F, YAN Y F. Effects of water level on occurrence and control of weeds in direct-seeding rice field[J]. Weed Science, 2010, 28(2): 41–43.
- [7] BHAGAT R M, BHUIYAN S I, MOODY K. Water, tillage and weed interactions in lowland tropical rice: a review[J]. Agricultural Water Management, 1996, 31(3): 165–184.
- [8] YASIN M, ANDREASEN C. Effect of reduced oxygen concentration on the germination behavior of vegetable seeds[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2016, 57(5): 453–461.
- [9] 郭晓红, 郑桂萍, 殷大伟, 等. 结实前水分供应对寒地水稻灌浆动态和产量的影响 [J]. 水土保持通报, 2012, 32(4): 86–91.
GUO X H, ZHENG G P, YIN D W, et al. Effects of water supply during stage of before-heading on filling dynamics and yield of rice in cold regions[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(4): 86–91.
- [10] 张静, 刘娟, 陈浩, 等. 干湿交替条件下稻田土壤氧气和水分变化规律研究 [J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(4): 408–413.
ZHANG J, LIU J, CHEN H, et al. Change in soil oxygen and water contents under alternate wetting and drying in paddy fields[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(4): 408–413.
- [11] BOUMA T J, BRYLA D R. On the assessment of root and soil respiration for soils of different textures: interactions with soil moisture contents and soil CO₂ concentrations[J]. Plant and Soil, 2000, 227(1): 215–221.
- [12] ZHOU W G, CHEN F, MENG Y J, et al. Plant waterlogging/flooding stress responses: From seed germination to maturation[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2020, 148: 228–236.
- [13] KUMUTHA D, SAIRAM R K, EZHILMATHI K, et al. Effect of waterlogging on carbohydrate metabolism in pigeon pea (*Cajanus cajan* L.): upregulation of sucrose synthase and alcohol dehydrogenase[J]. Plant Science, 2008, 175(5): 706–716.
- [14] 王欣, 高贤明. 模拟水淹对三峡库区常见一年生草本植物种子萌发的影响 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(12): 1404–1413.
WANG X, GAO X M. Effects of simulated submergence on seed germination of four common annual herbs in the Three Gorges Reservoir Region, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(12): 1404–1413.
- [15] CORNAGLIA P S, SCHRAUF G E, DEREGIBUS V A. Flooding and grazing promote germination and seedling establishment in the perennial grass *Paspalum dilatatum*[J]. Austral Ecology, 2009, 34(3): 343–350.
- [16] 束龙仓, 王哲, 袁亚杰, 等. 近 40 年三江平原典型区土地利用变化及其对地下水的影响 [J]. 水利学报, 2021, 52(8): 896–906.
SHU L C, WANG Z, YUAN Y J, et al. Land use change and its impact on groundwater in the typical district of Sanjiang Plain during the past 40 years[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(8): 896–906.
- [17] 李森. 东北黑土农田抗生素抗性基因污染及调控研究 [M]. 中国科学院大学, 2021.
LI S. Study on antibiotic resistance gene pollution and regulation in Northeast black soil farmland[M]. University of the Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [18] 杜国明, 张扬, 李全峰. 21 世纪以来三江平原农作物种植结构演化研究 [J]. 农业现代化研究, 2019, 40(5): 736–744.
DU G M, ZHANG Y, LI Q F. The evolution path of crop structure in the Sanjiang Plain in the 21st century[J]. Research of Agricultural Modernization, 2019, 40(5): 736–744.
- [19] ULLAH S, KHAN M I, KHAN M N, et al. Efficacy of naphthyl acetic acid foliar spray in moderating drought effects on the morphological and physiological traits of maize plants (*Zea mays* L.) [J]. ACS Omega, 2023, 8(23): 20488–20504.
- [20] WANG C Y, WU B D, JIANG K. Allelopathic effects of Canada goldenrod leaf extracts on the seed germination and seedling growth of lettuce reinforced under salt stress[J]. Ecotoxicology, 2019, 28(1): 103–116.
- [21] 金明, 刘旭升, 逢洪波, 等. 水稻芽期耐寒性综合评价及耐寒指标筛选 [J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(7): 25–35.
JIN M, LIU X S, PANG H B, et al. Comprehensive evaluation of cold tolerance and selection of cold tolerant evaluation indicators of rice at the germination stage[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(7): 25–35.
- [22] LI X, YU M H, DING G D, et al. Soil biocrusts reduce seed germination and contribute to the decline in *Artemisia ordosica* Krasch. shrub populations in the Mu Us Sandy Land of North China[J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 26: e01467.
- [23] LIU B, JIANG M, TONG S Z, et al. Differential flooding impacts on *Echinochloa caudata* and *Scirpus planiculmis*: implications for weed

- control in wetlands[J]. *Wetlands*, 2016, 36(5): 979–984.
- [24] KATO-NOGUCHI H, KURNIADIE D. The invasive mechanisms of the noxious alien plant species *Bidens pilosa*[J]. *Plants*, 2024, 13(3): 356.
- [25] ROBERTS E H, ELLIS R H. Water and seed survival[J]. *Annals of Botany*, 1989, 63(1): 39.
- [26] 杨兴云, 乔丹丹, 张雅洁, 等. 鸭茅响应水淹胁迫的 miRNA 差异表达分析 [J]. *草业学报*, 2022, 31(6): 150–162.
- YANG X Y, QIAO D D, ZHANG Y J, et al. A differential gene expression analysis of miRNA in *Dactylis glomerata* in response to flooding stress[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(6): 150–162.
- [27] TURRA G M, CUTTI L, ANGOESE P S, et al. Variability to flooding tolerance in barnyardgrass and early flooding benefits on weed management and rice grain yield[J]. *Field Crops Research*, 2023, 300: 108999.
- [28] 施美芬, 曾波, 申建红, 等. 植物水淹适应与碳水化合物的相关性 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34(7): 855–866.
- SHI M F, ZENG B, SHEN J H, et al. A review of the correlation of flooding adaptability and carbohydrates in plants[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(7): 855–866.
- [29] MORAVCOVÁ L, ZÁKRAVSKÝ P, HROUDOVÁ Z. Germination and seedling establishment in *Alisma gramineum*, *A. Plantago-Aquatica* and *A. lanceolatum* under different environmental conditions[J]. *Folia Geobotanica*, 2001, 36(2): 131–146.
- [30] 刘玫, 王臣, 刘鸣远. 泽泻个体发育早期器官发育顺序的研究 [J]. *植物研究*, 2002, 22(2): 173–175+260.
- LIU M, WANG C, LIU M Y. Study on the organic development sequence of *Alisma orientale* jus. in early stage of ontogeny[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2002, 22(2): 173–175+260.
- [31] BADALZADEH A, DANESH SHAHRAKI A. Effect of hydro-priming and salinity stress on germination indices of Niger (*Guizotia abyssinica* Cass.) [J]. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 2021, 69(4): 511–518.
- [32] JAVID M, ULLAH S, AMIN F, et al. Computing the effects of temperature and osmotic stress on the seed germination of *Helianthus annuus* L. by using a mathematical model[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 9978.
- [33] COLMER T D, VOESENEK L A C J. Flooding tolerance: suites of plant traits in variable environments[J]. *Functional Plant Biology*, 2009, 36(8): 665.
- [34] VARTAPETIAN B B, JACKSON M B. Plant adaptations to anaerobic stress [J]. *Annals of Botany*, 1997, 79(suppl 1): 3–20.
- [35] OGOREK L P, STRIKER G G, MOLLARD F P O. *Echinochloa crus-galli* seed physiological dormancy and germination responses to hypoxic floodwaters[J]. *Plant Biology*, 2019, 21(6): 1159–1166.
- [36] ZHANG Z C, WANG H C, CAO J J, et al. Seed biology of alkali barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli* var. *zelayensis*) and junglerice (*Echinochloa colona*) for improved management in direct-seeded rice[J]. *Weed Science*, 2023, 71(2): 112–123.
- [37] NARAYANA RAO A. *Echinochloa colona* and *Echinochloa crus-galli* [M]//Biology and Management of Problematic Crop Weed Species. Amsterdam: Elsevier, 2021: 197–239.
- [38] 潘澜, 薛立. 植物淹水胁迫的生理学机制研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2012, 31(10): 2662–2672.
- PAN L, XUE L. Plant physiological mechanisms in adapting to waterlogging stress: a review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(10): 2662–2672.
- [39] YUAN L B, CHEN M X, WANG L N, et al. Multi-stress resilience in plants recovering from submergence[J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2023, 21(3): 466–481.
- [40] BHATT A, DAIBES L F, GALLACHER D J, et al. Water stress inhibits germination while maintaining embryo viability of subtropical wetland seeds: a functional approach with phylogenetic contrasts[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 906771.
- [41] KENNEDY R A, RUMPHO M E, VANDERZEE D. Germination of *Echinochloa crus-galli* (barnyard grass) seeds under anaerobic conditions[J]. *Plant Physiology*, 1983, 72(3): 787–794.
- [42] 韩祯, 王世岩, 刘晓波, 等. 基于淹水时长梯度的鄱阳湖优势湿地植被生态阈值 [J]. *水利学报*, 2019, 50(2): 252–262.
- HAN Z, WANG S Y, LIU X B, et al. Ecological thresholds for the dominated wetland plants of Poyang Lake along the gradient of flooding duration[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(2): 252–262.