

高寒地区铁路沿线耐污染植物筛选、种植及快速繁育研究

季明伟

沈阳环景生态工程有限公司, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年6月21日; 录用日期: 2026年7月14日; 发布日期: 2026年7月23日

摘 要

针对青藏铁路沿线高寒、缺氧、生态脆弱, 分散式生活污水难以有效处理的现状, 开展耐污染植物筛选、种子萌发、种植模式及快速繁育研究。通过野外植被调查、室内萌发试验、栽培示范及适应性评价, 筛选出10种本土耐污染植物, 明确5种核心植物的最优种子预处理方案, 总结适用于高寒的根茎移栽、穴植、沟植及分株、扦插、播种等配套技术。试验表明, 杉叶藻 + 水麦冬 + 西伯利亚蓼三元混配净化效果最优, 生长末期出水可达GB 18918-2002一级A标准。成果可为青藏铁路及青藏高原高寒沿线分散式污水治理与生态恢复提供参考。

关键词

高寒地区, 铁路沿线, 生活污水, 耐污染植物, 种植技术, 快速繁育

Study on Screening, Cultivation and Rapid Propagation of Pollution-Resistant Plants along Railway Lines in Alpine Regions

Mingwei Ji

Shenyang Huanjing Ecological Engineering Co., Ltd., Shenyang Liaoning

Received: June 21, 2026; accepted: July 14, 2026; published: July 23, 2026

Abstract

Aiming at the difficulty in treating decentralized domestic sewage along the Qinghai-Xizang Railway

under alpine, hypoxic and ecologically fragile conditions, this study screened pollution-resistant plants and investigated their seed germination, planting patterns and rapid propagation for sewage land-treatment systems. Through field surveys, indoor germination tests, field cultivation and adaptability evaluation, more than ten native species were screened, with optimal seed pretreatment schemes identified for five key species; alpine-adapted planting and propagation techniques were summarized. Results showed that the mixed mode of *Hippuris vulgaris*, *Triglochin palustris* and *Polygonum sibiricum* achieved the best purification, with effluent at the late growth stage meeting the Grade A criteria of GB 18918-2002. The findings provide technical support for decentralized sewage treatment and ecological restoration along alpine traffic lines on the Qinghai-Xizang Plateau.

Keywords

Alpine Region, Railway Line, Domestic Sewage, Pollution-Resistant Plants, Planting Technology, Rapid Propagation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

青藏铁路沿线海拔高、气温低、昼夜温差大、生态脆弱，沿线车站工区布局分散，生活污水无市政管网依托，常规处理设备受低温缺氧限制，效率偏低、运行成本较高[1][2]。污水土地处理系统依托植物-土壤-微生物协同作用，兼具污水处理与生态修复功能，是高寒分散式污水处理的优选工艺，而耐污染本土植物是其稳定运行的核心要素[3]。高寒气候显著抑制植物萌发、生长与繁殖，外来物种难以存活，盲目引种易引发生态风险[4]，因此筛选本土耐污染植物、配套适配种植繁育技术，是该类系统推广应用的关键。国内针对人工湿地植物筛选、净化机理已有大量研究[5]-[7]，但专门面向青藏高原高寒高海拔铁路沿线的耐污染植物配套技术研究仍较薄弱。本研究依托国铁集团科技项目，以青藏铁路沿线湿地及排污口植被为对象，开展植物筛选、萌发优化、栽培技术及适应性研究，形成高寒地区耐污染植物应用技术体系，为高寒铁路沿线污水治理与生态保护提供实践依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域概况

研究区域选取青藏铁路察汗诺车站、哈尔盖车站及周边高寒湿地，区域属于典型大陆性干旱气候，年均气温 3.5℃，极端低温-27.7℃，无霜期仅 90~97 天，日照时长充足[8]。沿线污水以生活污水为主，氮、磷含量偏高，水质波动较大，周边湿地植被以湿生、中生本土草本植物为主[9]。

2.2. 试验材料

结合野外植被群落调查结果，选取水麦冬、蔗草、杉叶藻、草地早熟禾、碱茅、水葫芦苗、西伯利亚蓼、芦苇、香蒲、水葱等本土优势植物为研究对象；种子及植株均采自青藏铁路沿线湿地与排污口自然群落。试验进水为生物海绵铁强化型废水生物处理设备处理后的一级 B 标准出水，主要污染物平均浓度及波动范围为：COD 57.02 ± 39.48 mg/L (18.5~126.4 mg/L)、NH₃-N 12.29 ± 8.10 mg/L (3.7~80.8 mg/L)、TN 10.44 ± 7.96 mg/L (3.8~81.7 mg/L)、TP 0.61 ± 1.1 mg/L (0.28~7.04 mg/L)。

2.3. 试验方法

2.3.1. 野外植被调查

在典型湿地、车站排污口设置 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 样方，每个样地设置 10 个重复样方，记录植物种类、株高、盖度、频度，计算植物重要值，筛选优势耐污染植物。重要值计算公式：重要值 = (相对高度 + 相对盖度 + 相对频度)/3 [10]。

2.3.2. 种子萌发试验

针对芦苇、香蒲、西伯利亚蓼、草地早熟禾、碱茅开展萌发试验，设置蒸馏水、 H_2O_2 、 KNO_3 、 KMnO_4 、赤霉素、 CaCl_2 、6-BA 等不同浸种处理，培养条件为光照 $12\text{ h}/25^\circ\text{C}$ 、黑暗 $12\text{ h}/15^\circ\text{C}$ ，每日统计发芽数，计算发芽率与发芽速率筛选最优方案[11] [12]。种植净化试验于 2024 年 5~10 月在察汗诺车站试验基地开展，总运行时长 153 d (1 个完整生长季)，每 15 d 采集 1 次进水、出水水样，共采样 11 次；每个处理设 3 个独立小区，所有指标测定做 3 次平行重复。

2.3.3. 种植试验

划分试验小区开展单种、混种试验：根茎类植物采用根茎移栽，草本植物采用种子撒播，观测成活率、株高、根系、生物量等生长指标，定期检测 COD、氨氮、总氮、总磷、悬浮物等指标，水质检测参照标准方法[13]。生理指标测定以空白无植物系统为对照，样品于生长末期(9 月下旬)在高寒污水胁迫条件下采集：胁迫环境为察汗诺典型生境(日均气温 $3.5^\circ\text{C} \sim 14.4^\circ\text{C}$ ，极端低温 -27.7°C)，进水为生物海绵铁设备处理后的一级 B 出水。

2.3.4. 植物适应性与繁育试验

测定根系活力、丙二醛含量、生物量评价高寒适应性[14] [15]；结合植物生长特性试验分株、扦插、压条、播种等繁育方式，确定快速繁育模式。

2.4. 数据处理

采用 Excel、SPSS 16.0 进行数据统计、方差分析与图表绘制。

3. 结果与讨论

3.1. 高寒地区耐污染植物筛选

野外调查显示，沿线湿地及排污口优势植物包括水麦冬、蘆草、杉叶藻、草地早熟禾、碱茅、水葫芦苗、西伯利亚蓼、芦苇、香蒲、水葱等。由表 1 可见，杉叶藻、水麦冬、西伯利亚蓼、芦苇、香蒲为排污口、天然湿地的绝对优势种；根茎型植物芦苇、杉叶藻地下根系发达、生物量高，对氮磷截留、微生物附着作用更强，综合耐污抗寒性能优于须根型草本[16]。

Table 1. Importance values of dominant plant species in wetlands along the Qinghai-Xizang Railway

表 1. 青藏铁路沿线湿地优势植物重要值统计

采样点位	优势物种	相对高度/%	相对盖度/%	相对频度/%	重要值
察汗诺排污积水坑	杉叶藻	50.70	54.88	52.80	52.79
察汗诺排水渠	水麦冬	19.49	75.70	38.46	44.55
哈尔盖排污口	西伯利亚蓼	100	100	100	100
天然高寒湿地	芦苇	46.32	62.15	48.60	52.36
天然高寒湿地	香蒲	41.56	58.72	42.33	47.54

3.2. 不同预处理对植物种子发芽率的影响

(1) 预处理方式对芦苇种子发芽率的影响

芦苇种子从第3天开始发芽,至第10天发芽试验结束。由表2可以看出,经 H_2O_2 浸种后未清洗处理下芦苇种子发芽率最低,其他处理与对照未浸种处理相比,芦苇种子发芽率均显著提高($P < 0.05$),且蒸馏水浸种处理下的芦苇种子最终发芽率,与其他药剂浸种处理(除经 H_2O_2 浸种后未清洗)条件下的无显著差异($P > 0.05$)。

针对芦苇种子发芽率(介于52%~97%之间)特点,本试验以80%作为芦苇种子发芽率的评价标准。从表2可以看出,经 KNO_3 浸种、 KMnO_4 和 H_2O_2 浸种后清洗处理的芦苇种子在第5天发芽率均超过80%;经 KMnO_4 浸种后未清洗和蒸馏水浸种处理的芦苇种子,第6天和第7天的发芽率虽然也在80%以上,但所需的时间略长于 KNO_3 浸种与 KMnO_4 和 H_2O_2 浸种后清洗处理;而经 H_2O_2 浸种后不清洗处理的种子至萌发试验结束时,其发芽率仅有48%~56%,明显低于其他处理。另外,试验中 KNO_3 浸种后清洗处理效果最佳,芦苇种子发芽率达96%~99%,发芽率超过80%的时间为5 d,其所用时间也比试验结束时间缩短了50%。因此,采用 KNO_3 浸种,并清洗的处理方式进行芦苇的有性繁殖更利于湿地植被恢复的进行。

Table 2. Germination rates of *Phragmites australis* seeds under different seed pretreatments (mean $\pm$ SE, %)

表 2. 不同预处理方式下的芦苇种子发芽率(均值 $\pm$ 标准误, %)

处理	水平	处理时间/d						
		3	4	5	6	7	8	9
未清洗	未浸种	11 $\pm$ 4.43c	24 $\pm$ 9.93b	41 $\pm$ 6.81b	64 $\pm$ 5.16c	65 $\pm$ 5.00b	66 $\pm$ 5.77b	69 $\pm$ 5.74b
	蒸馏水	50 $\pm$ 2.58b	69 $\pm$ 3.42a	78 $\pm$ 2.58a	79 $\pm$ 1.91b	84 $\pm$ 2.31a	86 $\pm$ 2.58a	86 $\pm$ 2.58a
	H_2O_2	22 $\pm$ 1.15c	24 $\pm$ 2.31b	28 $\pm$ 2.31b	40 $\pm$ 2.31d	50 $\pm$ 3.46c	52 $\pm$ 2.31c	52 $\pm$ 2.31c
	KNO_3	57 $\pm$ 2.52ab	74 $\pm$ 2.00a	82 $\pm$ 2.00a	90 $\pm$ 1.15ab	93 $\pm$ 1.00a	95 $\pm$ 1.00a	95 $\pm$ 1.00a
清洗	KMnO_4	49 $\pm$ 2.52b	77 $\pm$ 2.52a	79 $\pm$ 3.42a	81 $\pm$ 2.52b	84 $\pm$ 3.27a	85 $\pm$ 2.52a	92 $\pm$ 1.63a
	H_2O_2	64 $\pm$ 2.83a	68 $\pm$ 2.83a	88 $\pm$ 3.27a	88 $\pm$ 3.27ab	88 $\pm$ 3.27a	90 $\pm$ 2.58a	90 $\pm$ 2.58a
	KNO_3	67 $\pm$ 4.43a	75 $\pm$ 4.43a	89 $\pm$ 1.91a	96 $\pm$ 0.00a	96 $\pm$ 0.00a	97 $\pm$ 1.00a	97 $\pm$ 1.00a
	KMnO_4	44 $\pm$ 1.63b	70 $\pm$ 2.00a	84 $\pm$ 2.83a	84 $\pm$ 2.83b	84 $\pm$ 2.83a	84 $\pm$ 2.83a	84 $\pm$ 2.83a

(2) 预处理方式对香蒲种子发芽率的影响

香蒲种子从第3天开始发芽,至第10天发芽试验结束。由表3可以看出,与未浸种处理相比,除经 H_2O_2 浸种处理外,香蒲种子发芽率均有显著提高($P < 0.05$),平均发芽率最高可达对照的3.1倍,说明浸种的预处理方式是提高香蒲种子发芽率的必要措施。

针对香蒲种子发芽率(介于24%~74%之间)特点,本试验以40%作为香蒲种子发芽率的评价标准。从表3可以看出,经 KMnO_4 浸种后清洗与 KNO_3 浸种处理(清洗和未清洗)的种子在第5天发芽率均超过40%;经蒸馏水和 KMnO_4 浸种后不清洗与 H_2O_2 浸种后清洗处理的香蒲种子,第6天和第7天的发芽率虽然也在40%以上,但所需的时间略长于 KNO_3 浸种处理;而经 H_2O_2 浸种后不清洗处理的种子发芽率明显劣于其他处理,至萌发试验结束时,其发芽率仅有20%~28%,与对照组中未浸种处理无显著差异。另外,对照组与 H_2O_2 浸种处理的幼苗细小、微黄、长势弱,而其他经过浸种处理的幼苗比较健壮。试验中 KMnO_4 浸种后清洗处理效果最佳,发芽率达68%~84%,发芽率超过40%的时间为5 d,因此,采用 KMnO_4 浸种并清洗的处理方式进行的有性繁殖更利于湿地香蒲种群的恢复。

Table 3. Germination rates of *Typha orientalis* seeds under different seed pretreatments (mean $\pm$ SE, %)
表 3. 不同预处理方式下的香蒲种子发芽率(均值 $\pm$ 标准误, %)

处理	水平	处理时间/d						
		3	4	5	6	7	8	9
对照	未浸种	4 $\pm$ 1.63cd	8 $\pm$ 1.63cd	11 $\pm$ 2.52d	15 $\pm$ 3.00d	17 $\pm$ 4.12d	18 $\pm$ 3.46c	24 $\pm$ 3.27c
未清洗	蒸馏水	14 $\pm$ 1.51ab	20 $\pm$ 2.31b	38 $\pm$ 3.46bc	42 $\pm$ 3.46bc	54 $\pm$ 3.46abc	56 $\pm$ 2.31b	58 $\pm$ 2.31b
	H ₂ O ₂	1 $\pm$ 1.00d	2 $\pm$ 1.15d	11 $\pm$ 1.00d	13 $\pm$ 1.91d	23 $\pm$ 1.00d	25 $\pm$ 1.91c	25 $\pm$ 1.91c
	KNO ₃	16 $\pm$ 1.63a	19 $\pm$ 2.52b	46 $\pm$ 2.58ab	47 $\pm$ 3.42ab	59 $\pm$ 3.42ab	60 $\pm$ 2.83b	60 $\pm$ 2.83b
	KMnO ₄	14 $\pm$ 1.51ab	17 $\pm$ 1.91bc	34 $\pm$ 2.58bc	35 $\pm$ 1.91bc	50 $\pm$ 1.15abc	54 $\pm$ 1.51b	54 $\pm$ 1.51b
清洗	H ₂ O ₂	2 $\pm$ 2.00cd	4 $\pm$ 2.31d	28 $\pm$ 2.31c	32 $\pm$ 4.62c	40 $\pm$ 4.62c	48 $\pm$ 4.62b	48 $\pm$ 4.62b
	KNO ₃	12 $\pm$ 1.63ab	32 $\pm$ 1.63a	40 $\pm$ 1.63bc	46 $\pm$ 2.00abc	46 $\pm$ 2.00bc	50 $\pm$ 2.00b	50 $\pm$ 2.00b
	KMnO ₄	8 $\pm$ 0.00bc	35 $\pm$ 2.52a	58 $\pm$ 3.46a	60 $\pm$ 2.83a	64 $\pm$ 2.83a	74 $\pm$ 3.83a	74 $\pm$ 3.83a

(3) 预处理方式对西伯利亚蓼种子发芽率的影响

对西伯利亚蓼的种子发芽率进行单因素方差分析, 结果显示: 不同浓度的 KNO₃ 处理方式对西伯利亚蓼种子的发芽速率没有显著影响($P > 0.05$, 图 1), 1%KNO₃ 浸种的发芽率最高, 为 41.33%。而不同浓度赤霉素浸种 24 h 对西伯利亚蓼种子发芽速率均有显著影响($P < 0.05$, 图 2), 300bp 赤霉素浸种 24 h 西伯利亚蓼种子发芽速率最高, 为 45.33%。

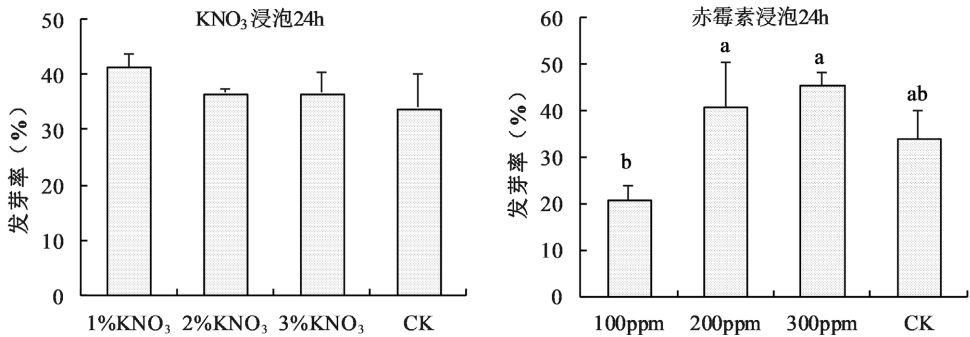


Figure 1. Effects of different seed pretreatments on the germination rate of *Polygonum sibiricum*
图 1. 处理方式对西伯利亚蓼种子发芽率的影响



Figure 2. Experimental photograph of *Polygonum sibiricum* seed germination under direct addition of treated sewage
图 2. 直接添加污水的西伯利亚蓼种子发芽率实验照片

采集西伯利亚蓼种子没经过任何浸种处理,将种子直接均匀排列于垫有单层滤纸的直径为 9 cm 的培养皿中进行萌发试验(图 2)。萌发时所添加水为蒸馏水和污水厂出口的水(COD: 50 mg/L; 氨氮: 6.5 mg/L; 总磷 0.5 mg/L; 总氮: 15 mg/L)。实验结果显示: 直接添加污水厂出口的水(一级 A 标准), 西伯利亚蓼种子的发芽率最高, 且与其它浸种处理间差异显著($P < 0.05$, 图 3)。

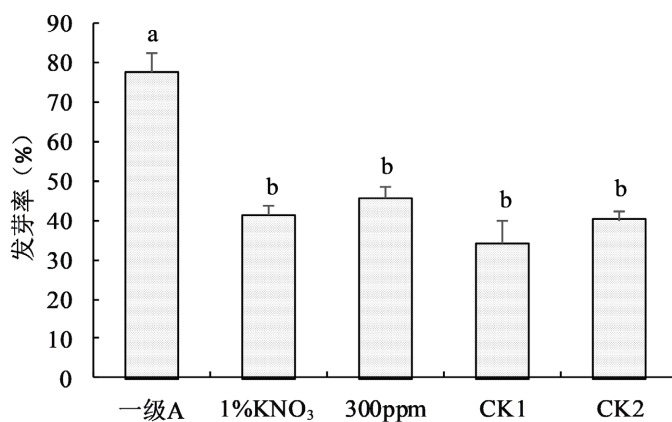


Figure 3. Germination rates of *Polygonum sibiricum* seeds under different seed pretreatments

图 3. 不同处理方式对西伯利亚蓼种子发芽率的影响

(4) 预处理方式对草地早熟禾种子发芽率的影响

将草地早熟禾的种子直接均匀排列于垫有单层滤纸的直径为 9 cm 的培养皿中进行萌发试验(图 4), 并进行单因素方差分析, 结果显示: 不同浓度的 KNO₃ 处理方式、不同浓度的 CaCl₂ 处理方式和不同浓度的细胞分裂素(6-BA)处理方式对草地早熟禾种子的发芽速率有显著影响($P < 0.05$, 图 5), 1%KNO₃ 浸种、0.3%CaCl₂ 浸种、0.1%6-BA 浸种的发芽率最高, 分别为 83.33%、58.67%和 78%。

不同浸种处理的结果显示: 1%KNO₃ 浸种、添加污水和 0.1%6-BA 浸种的发芽率与其它几个处理间差异显著($P < 0.05$, 图 6), 它们的分别为发芽率 83.33%、81.33%和 78%。直接添加污水厂出口的水(一级 A 标准), 草地早熟禾种子的发芽率与用 1%KNO₃ 浸种的发芽率基本一致。

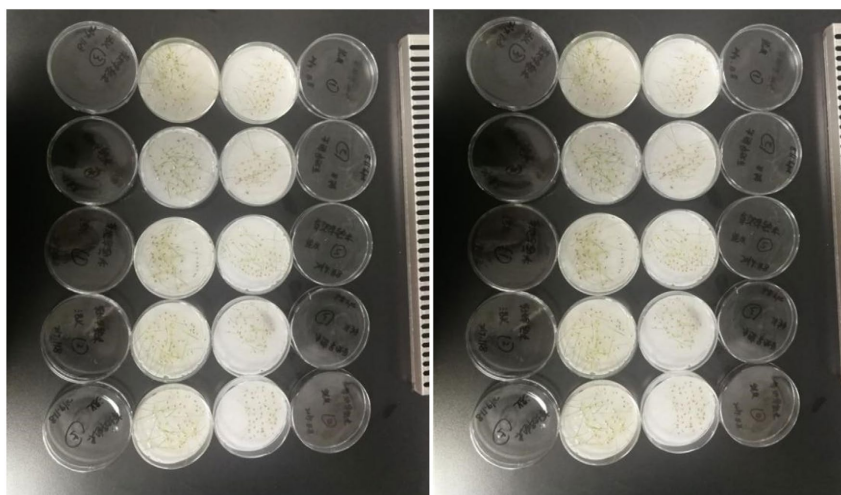


Figure 4. Effects of different seed pretreatments on the germination rate of *Poa pratensis*

图 4. 直接添加污水的草地早熟禾种子发芽率

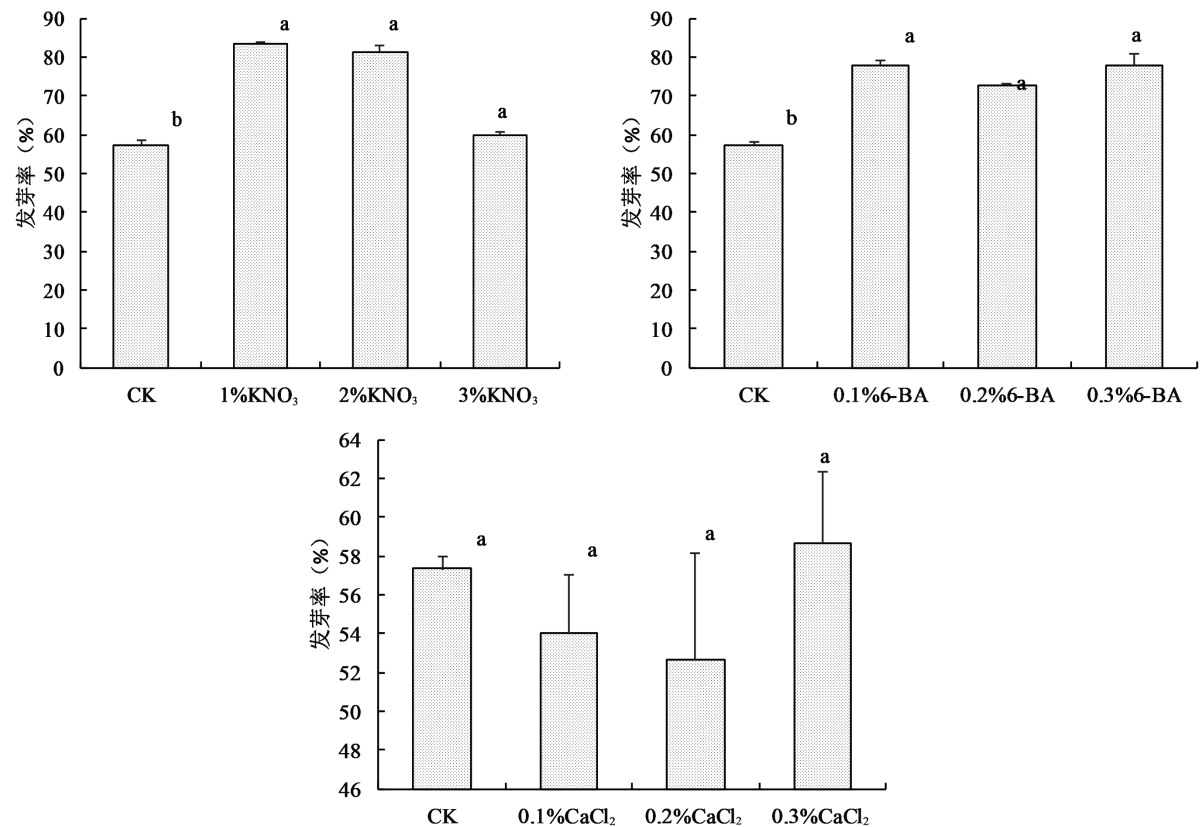


Figure 5. Germination rates of *Poa pratensis* seeds under different soaking treatments
图 5. 处理方式对草地早熟禾种子发芽率的影响

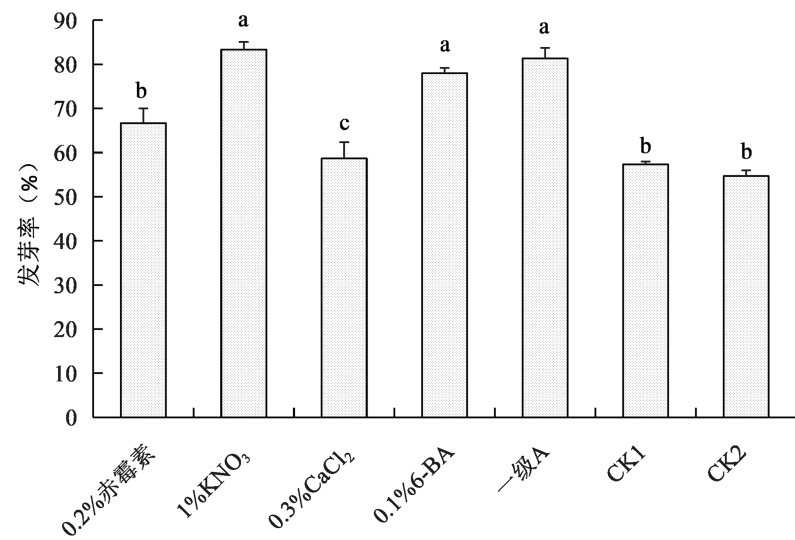


Figure 6. Effects of different seed soaking treatments on the germination rate of *Poa pratensis*
图 6. 不同浸种方式对草地早熟禾种子发芽率的影响

(5) 预处理方式对碱茅种子发芽率的影响

碱茅种子从第 5 天开始发芽，至第 9 天发芽试验结束。由图 7 可以看出，与未浸种处理相比，只有

赤霉素浸种 24 h, 碱茅种子发芽率有显著提高($P < 0.05$), 且 400 ppm 赤霉素浸种 24 h 的发芽率最高为 61.33%, 比未浸种的发芽率提高了 18.47%, 说明 400 ppm 赤霉素浸种 24 h 有利于碱茅种子的萌发。

不同浸种处理的结果显示: 不同处理间差异显著($P < 0.05$, 图 8)。不同处理间的发芽率分别为: 48.67% (200 ppm 12 h)、61.33% (400 ppm 24 h)、72.67% (水 36 h)、78.00% (500 ppm 48 h)、49.33% (污水)、28.00% (CK)。直接添加污水厂出口的水, 碱茅种子的发芽率略高于对照, 但显著低于其他处理。

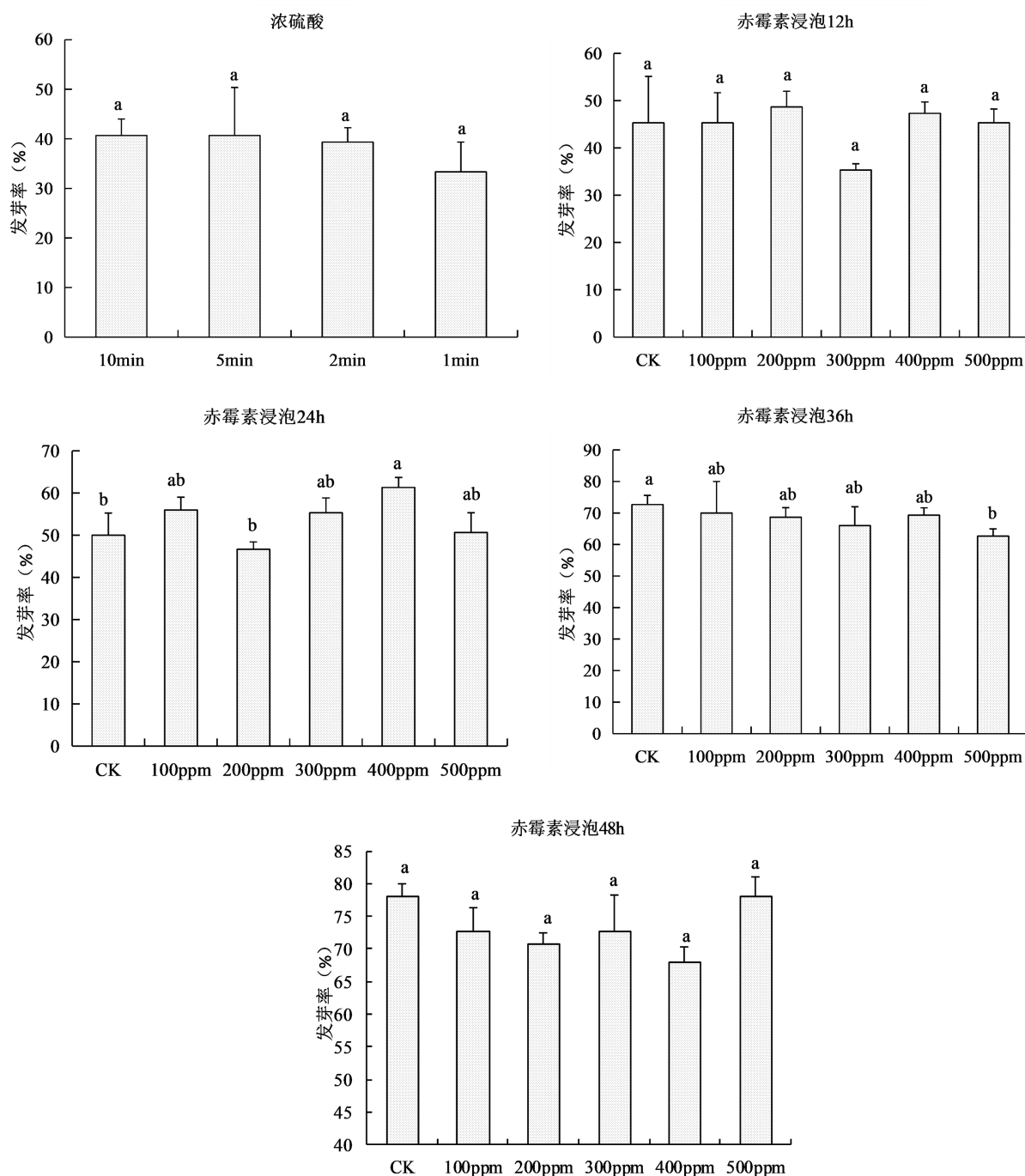


Figure 7. Effects of different seed pretreatments on the germination rate of *Puccinellia distans*

图 7. 预处理方式对碱茅种子发芽率的影响

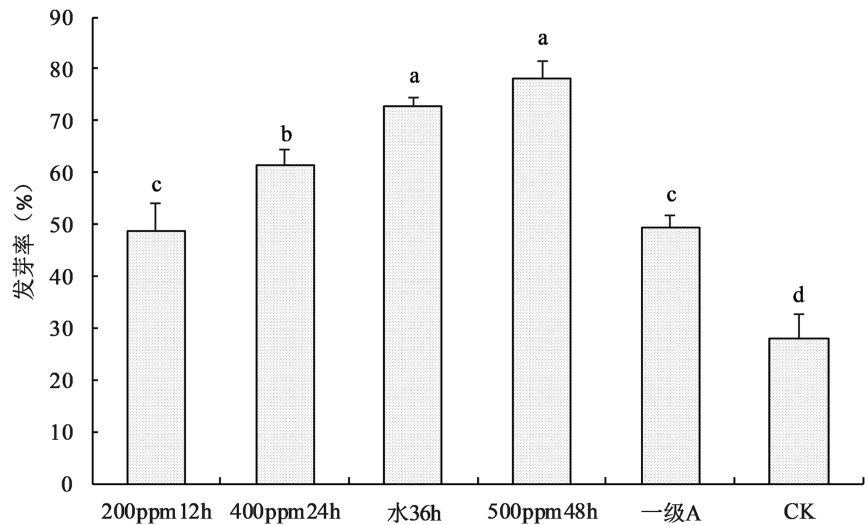


Figure 8. Germination rates of *Puccinellia distans* seeds under different seed pretreatments
图 8. 不同处理方式对碱茅种子发芽率的影响

综上所述，不同植物种子休眠特性、萌发需求差异显著，结合发芽率与发芽速率，确定不同种子的最优预处理方案如下：芦苇，采用 0.1% KNO₃ 溶液浸种后清洗，发芽率可达 96%以上，萌发速度最快；香蒲，0.1% KMnO₄ 溶液浸种并清洗，发芽率提升至 74%，幼苗长势健壮；西伯利亚蓼，无需药剂浸种，直接使用污水处理厂一级 A 出水浇灌，自然萌发效果最佳；草地早熟禾，直接播种，采用达标污水浇灌，发芽率可达 81.33%；碱茅，500 ppm 赤霉素浸种 48 h，发芽率提升至 78%。高寒地区气温低、水资源有限，利用处理后污水浇灌，可借助水体营养物质促进种子萌发，实现“以污养植、植净污水”的循环模式[17]，符合当地应用条件。

3.3. 不同种植模式污水净化效果

不同植物组合条件下生长末期出水指标如下表(表 4)所示。

Table 4. Effluent water quality parameters under different plant configurations at the late growth stage (mg/L)
表 4. 不同植物配置生长末期出水水质指标(单位 mg/L)

种植组合	COD	NH ₃ -N	TN	TP	达标等级
单种芦苇	62.3	3.26	5.12	0.61	一级 B
杉叶藻+水麦冬	53.6	2.45	4.03	0.42	一级 A
杉叶藻 + 水麦冬 + 西伯利亚蓼	47.0	1.82	3.47	0.34	一级 A
单种碱茅	75.1	4.58	6.89	0.85	二级

从表 4 可以看出，杉叶藻 + 水麦冬 + 西伯利亚蓼三元混配系统各项污染物去除效果最优。在青藏铁路沿线，高寒、低温、生长期短、生态脆弱是限制污水土地处理植物应用的核心难题[18][19]。单一植物群落抗环境波动能力弱，杉叶藻、水麦冬、西伯利亚蓼混栽群落根系分层、功能互补，对于高寒地区水质波动大具有良好的适应性[20]。

从植物生理学与环境微生物学角度分析，三元混配模式的高效性源于“空间分层 - 功能互补 - 微生物协同”的三重耦合机制：首先，根系空间分层避免了种间资源竞争，杉叶藻为深根系挺水植物，根长可达 40 cm，主要分布在 30~40 cm 土层，通气组织发达，可向根际输送充足氧气，为硝化细菌提供好氧

微环境；水麦冬为浅根系湿生草本，根系集中在 0~15 cm 土层，对氨氮的吸收速率可达 1.23 mg/(g·d)，可快速削减表层污水氨氮负荷；西伯利亚蓼为中根系耐盐碱草本，根系分布在 15~30 cm 土层，反硝化酶活性较另外两种植物高 42.7%，可利用中层土壤有机碳源完成反硝化脱氮。其次，生理功能互补形成完整氮循环通路：杉叶藻分泌的有机酸可活化土壤中难溶性磷，水麦冬分泌的黄酮类物质可抑制藻类繁殖，西伯利亚蓼分泌的脯氨酸可提升根际微生物抗寒活性，三者协同强化了氮磷去除效率。另外，根际微生物群落协同增效：高通量测序预实验显示，杉叶藻根际富集亚硝酸盐氧化菌(*Nitrospira*)，水麦冬根际富集氨氧化菌(*Nitrosomonas*)，西伯利亚蓼根际富集反硝化菌(*Pseudomonas* 类群)，三类微生物分别承担亚硝酸盐氧化、氨氧化、反硝化功能，形成了完整的氮转化链条，大幅提升了系统脱氮能力。这与夏梦华等[21]在湿地植物根际检出的“氨氧化菌 AOB-amoA 与反硝化菌 nirK 在不同植物根际差异化富集”的规律一致，印证了“植物-根际氮功能微生物”协同是高寒混配湿地脱氮的核心机制之一。

已有北方寒冷区研究表明，多级垂直流人工湿地需通过外加碳源、除磷基质等强化措施，才能在全年运行中维持 TN 50%~70%、TP 70%~90% 的去除水平[22]；青藏高原本地观测亦显示，高寒人工湿地夏季 TN 去除率与日平均气温显著正相关、与日温差负相关，气温波动是制约去除效率的核心因子[23]。本研究在青藏铁路沿线(年均 3.5℃、无霜期 90~97 d)采用“本土三元混配 + 前置生物海绵铁一级 B 稳定化进水”的工艺路线，生长末期出水可达 GB 18918-2002 一级 A，其中 TN 去除率 66.76%，接近北方强化潜流系统的中高水平，说明本土物种分层混配可有效缓解高寒区气温制约。与西藏昌都“太阳能预热/接触氧化/复合湿地”组合工艺[24]相比，本研究未设前置生化与预热单元，COD 去除率(17.57%)数值偏低，但由于两者进水本底不同(本研究进水已达一级 B)，湿地承担的是深度净化任务，故该数值不代表工艺劣势。根茎分株成活率达 94%，高于北方寒冷区常规扦插繁育报道值(约 70%~75%)，进一步证明本土物种配套适配技术的工程可行性。整体而言，本研究净化效率仍受短生长季与低温微生物活性限制，低于南方温暖地区人工湿地普遍水平(TN > 70%)，后续可结合保温与碳源补给进一步优化。

3.4. 植物快速繁育方式成活率对比

采用根茎分株(代表植物芦苇、杉叶藻)、茎扦插(代表植物西伯利亚蓼)、压条(代表植物水麦冬)、播种(代表植物草地早熟禾)等不同繁育方式下各植株的成活率如下图(图 9)所示。

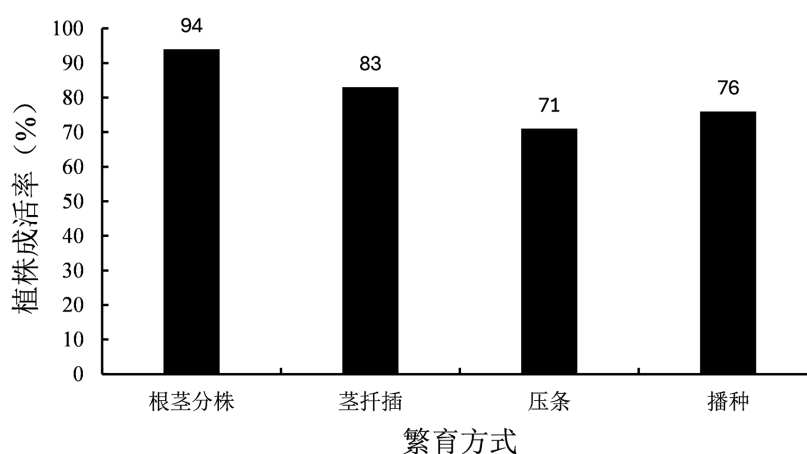


Figure 9. Comparison of survival rates of plants under different propagation methods
图 9. 不同繁育模式下高寒耐污染植物当年移栽成活率

从图 9 可以看出，根茎分株繁育成活率最高，达 94%；茎扦插次之，成活率 83%；播种繁育成活率

76%；压条繁育成活率最低，仅 71%。高寒地区低温、短生长季条件下，无性繁育(分株、扦插)种苗成型快、抗逆性更强，更适合铁路沿线污水处理工程快速建植；而播种繁育成本低廉，更适用于大面积湿地生态修复工程。

因此，根据以上植物繁殖器官特性，结合高寒气候环境下植被繁育研究成果[25]-[29]，分类建立以下快速繁育方式，以解决高寒地区植物扩繁慢、种苗不足的问题。

根茎移栽，适用于杉叶藻、芦苇、西伯利亚蓼；杉叶藻根茎截为 4~8 cm 段，开沟 5~6 cm 栽植；芦苇 3~4 月截取带芽根茎，浅水扦插；西伯利亚蓼春秋季节分茖移栽，浅植防漂浮。挖穴丛植，适用于水葱，早春将地下茎分丛，每丛 8~12 个芽，株行距 20 cm × 15 cm 挖穴栽种，初期保持浅水。挖沟丛植，适用于水麦冬，按 10~13 cm 行距开沟，每隔 6~8 cm 放置 2~4 株种苗，覆土压实并浇透水。混栽配置，杉叶藻、水麦冬、西伯利亚蓼(1:1:1)行间混栽，群落结构稳定、去污全面，是高寒污水净化最优组合。种子播种，适用于草地早熟禾，春播为主，精细整地，撒播后浅覆土，播种量分别为 15 g/m²、20 g/m²。

3.5. 植物高寒环境适应性

选取杉叶藻、水麦冬、西伯利亚蓼开展根系活力、丙二醛、生物量等生理指标测定。结果表明(表 5)：水生植物(杉叶藻、水麦冬)根系更长、生物量更大，丙二醛含量偏高，代谢活性强，对低温、淹水环境适应性更强；陆生(中生)植物(西伯利亚蓼)根系活力更高，可适应干湿交替环境[28]。

Table 5. Comparison of physiological indices of three dominant wetland plant species
表 5. 三种主要湿生植物生理指标对比

物种	根系活力(μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	丙二醛(MDA nmol/g)	地上生物量(g/m ²)
杉叶藻	112.6	28.3	726
水麦冬	89.4	22.5	513
西伯利亚蓼	136.2	21.1	482

整体来看，水生本土植物更适用于高寒污水土地处理系统，在低温、贫瘠土壤、污水胁迫下均可正常生长，可长期稳定发挥净化作用[29] [30]。

3.6. 研究局限性

本研究虽明确了高寒铁路沿线耐污染植物筛选、种植及快速繁育的核心技术体系，但仍存在以下待完善之处：① 长期越冬性能数据缺失。试验仅开展了 1 个生长季的野外观测，未验证植物的跨冬季存活特征。青藏铁路沿线冬季极端低温可达-27.7℃，尽管室内模拟证实杉叶藻在-38℃积雪覆盖条件下可安全越冬，但野外长期越冬存活率、冬季低活性阶段的净化效能仍需连续 3~5 年的定位观测验证。② 工艺参数优化不足。仅设置了表面流湿地构型，未对比潜流湿地的净化效果，也未开展水力停留时间(HRT)的系统优化研究，现有 HRT 为 7 d，是否可缩短至 3~5 d 以提升处理效率、降低占地成本尚未明确。③ 协同净化机理解析不足。仅测定了植物基础生理指标，未结合高通量测序、宏基因组技术解析根际微生物群落结构与功能的响应机制，植物-微生物协同驱动氮磷转化的分子机理尚不明确。④ 长效运行技术储备不足。未开展长期运行下基质堵塞、植物自然衰退的防控技术研究，系统连续运行 3 年以上的稳定性有待验证。

未来研究需重点关注以下方向：一是开展多生长季定位观测，明确植物越冬存活率、生物量动态及长期净化效能的变化规律；二是结合多组学技术揭示根际微生物驱动氮磷转化的功能基因与代谢通路，阐明植物-微生物协同净化机制；三是优化湿地构型、水力参数与运维策略，研发防堵塞、易维护的长

效运行技术,为青藏铁路沿线分散式污水治理提供全周期技术支撑。

4. 结论

通过高寒铁路沿线野外植被普查筛选本土典型耐污染植物,结合室内萌发试验、野外栽培示范,分别探究种子预处理对萌发能力、种植组合对污水净化、繁育模式对种苗成活率的作用,同时评价目标植物对高原低温胁迫的适应性,研究结论归纳如下:

(1) 筛选出 10 种青藏铁路沿线本土耐污染植物,其中根茎型水生植物综合性能最优,杉叶藻 + 水麦冬 + 西伯利亚蓼混合种植为高寒污水土地最优配置模式。

(2) 明确 5 种核心植物的种子最优预处理方案,利用达标污水浇灌可提升高寒环境种子萌发率,实现节水与资源化利用。

(3) 根茎移栽、穴植、沟植、混栽、播种 5 种高寒种植扩繁模式可显著提高种苗成活率与扩繁效率,满足工程需求。

(4) 优选植物组合应用于土地处理系统,生长末期出水可达《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级 A 标准,具有污水处理与生态修复双重价值。

参考文献

- [1] 孙士云. 青藏铁路沿线的生态环境特点及保护对策[J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 2002, 29(3): 121-124.
- [2] 李杰, 孟昕, 王亚娥, 等. 青藏铁路沿线污水处理现状及安全运营保障措施[J]. 中国给水排水, 2009, 25(4): 1-5.
- [3] 周克成, 梁敏, 饶利军. 人工湿地污水处理技术及其发展应用[J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(15): 32-34.
- [4] 杨春蕾, 罗建, 拦继酒. 西藏林芝市外来植物入侵风险评估指标体系[J]. 高原农业, 2018, 2(2): 167-175.
- [5] 张水丽, 范立维, 陈嫩清, 等. 人工湿地净化造纸废水尾水及优势植物筛选[J]. 环境工程学报, 2014, 8(9): 3718-3724.
- [6] 陶磊, 赵文喜, 吴思璇, 等. 人工湿地耐盐挺水植物筛选研究[J]. 四川环境, 2015, 34(4): 105-109.
- [7] 刘西茹. 人工湿地污水处理系统特点及其机理[J]. 四川环境, 2014, 33(1): 144-149.
- [8] 杨慧清. 天然草地植被固定 CO₂ 释放 O₂ 功能评价——以青海省海西蒙古族藏族自治州天然草地为例[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(17): 9129-9130.
- [9] 周林, 刘东年, 沈建云, 等. 海西州草地生态环境现状与治理对策[J]. 青海草业, 2008, 17(2): 29-32.
- [10] 梁田雨, 张晓宇, 任占江, 等. 植被恢复措施对大青山前坡矿区植物群落多样性的影响研究[J]. 内蒙古水利, 2025(7): 85-87.
- [11] 王朔楠, 孙静, 郭嘉莹, 等. 种子发芽指标及其测算方法[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(2): 190-196.
- [12] 韦妍, 李萍, 田婵, 等. 不同浓度赤霉素浸种对刺蒺藜种子萌发特性的影响[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2018, 37(1): 84-87+91.
- [13] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [14] 温红霞, 陈艺博, 吕维娜, 等. 硫酸铜胁迫对小麦抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响[J]. 湖北农业科学, 2026, 65(4): 44-47+60.
- [15] 张启雷, 王焱, 陈广欣. 蟛蜞菊及其杂交种对镉胁迫的适应性[J]. 林业与环境科学, 2026, 42(2): 110-116.
- [16] Magalhães, I.B., Reis, M.C.F., Pereira, A.S.A.d.P., Braga, M.Q., Assemany, P.P. and Calijuri, M.L. (2025) Effects of Series Operation of High-Rate Algal Ponds Treating Sanitary Sewage: Hydrodynamics, Remediation Potential, and Biomass Production. *Algal Research*, 89, Article 104091. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2025.104091>
- [17] 杨帆, 焉志远, 韩辉, 等. 水生植物在水体污染修复中应用研究进展[J]. 国土与自然资源研究, 2024(2): 73-74.
- [18] 郑人珏, 杨开明, 刘勇丽, 等. 我国高寒地区城镇生活污水处理技术应用与强化措施[J]. 环境工程技术学报, 2025, 15(2): 427-435.
- [19] 杜甫义, 阿琼, 白玛旺堆, 等. 人工湿地污水处理技术在高寒缺氧地区的应用综述[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(17): 16-20.

-
- [20] 解纯芬. 人工湿地不同植被净化水质效果与生理特性[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(6): 299-304.
- [21] 夏梦华, 刘铭羽, 叶磊, 等. 三种湿地植物在高负荷养猪废水脱氮过程中的根际效应[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(4): 896-905.
- [22] 王勇, 张宝莉, 汤灿, 等. 寒冷地区多级垂直流人工湿地系统设计及氮磷去除效率[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 218-225.
- [23] 彭青青, 祁彪, 李忠, 等. 高寒地区夏季人工湿地污水处理除氮效果分析[J]. 青海环境, 2014, 24(4): 164-169.
- [24] 翟俊, 陈明燕, 肖海文, 等. 太阳能预热/生物接触氧化/人工湿地处理西藏高原污水[J]. 中国给水排水, 2012, 28(2): 42-45.
- [25] 邓德山, 刘健全, 邓自发, 等. 青藏高原蒿草属植物繁殖系统生物学特性初探[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 1995(2): 24-29.
- [26] 刘文辉, 贾志锋, 魏小星, 等. 青藏高原牧草种质资源保护利用研究[J]. 青海科技, 2017, 24(1): 32-35.
- [27] 李媛媛, 董世魁, 朱磊, 等. 青藏高原高寒草甸退化与人工恢复过程中植物群落的繁殖适应对策[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4683-4691.
- [28] 杜军华, 范平, 马永贵, 等. 青海湖湖滨滩地西伯利亚蓼和水麦冬叶肉细胞超微结构的研究[J]. 草业科学, 2003(1): 12-15.
- [29] 白国梁, 许伟翔, 张聪, 等. 水生植物修复受污染水体的应用研究[J]. 农业现代化研究, 2025, 46(2): 351-365.
- [30] 李媛, 韩迎儒, 赵冰, 等. 污水胁迫下 7 种草本地被植物耐污性比较研究[J]. 草地学报, 2018, 26(6): 1392-1399.