

河北省白梨商业果园的果实颜色二态性、真菌病原体与黄寄生管理

郑融^{1,2}

¹美国俄勒冈州达勒西市风峡社区学院

² 东北林业大学林学院森林病理与害虫防治重点实验室，黑龙江省哈尔滨市和兴路 26 号，邮编 150040，中国

摘要

河北省白梨果业同时栽培绿色黄色（GY）和红色晕斑（RB）两种果皮类型，其对生物胁迫的差异尚不明确。本研究在六个商品化白梨果园中，每园采集一千二百枚果实，统计果皮二态比例；通过 ITS-rDNA 与 β -微管蛋白测序鉴定潜伏真菌群落，并在六百株梨树上评估黄寄生危害等级。结果显示，RB 果型潜伏的葡萄座腔菌感染率较 GY 型低 38 % ($P < 0.05$)，且果皮总酚含量高 2.3 倍。黄寄生危害度与树高呈正相关 ($r = 0.58$)，与果型无显著关系。0.8 公顷裂区试验表明，300 mg·L⁻¹ 乙烯利干注使黄寄生危害降低 71 %、商品果产量提高 12 %，经济收益净增 8 320 元·公顷⁻¹，优于机械修剪或轮换杀菌剂处理。研究建议依据果皮颜色优化采收，并推荐乙烯利干注作为高密度梨园兼控黄寄生与潜伏真菌的经济策略。

关键词

果实颜色二态性；花青素；白梨；葡萄座腔菌；黄寄生；综合病虫害管理；河北省

Fruit-Colour Dimorphism, Fungal Pathogens, and Management of Asian Mistletoe in Commercial Pear (*Pyrus bretschneideri*) Orchards of Hebei Province

Rong Zheng^{1,2}

¹Columbia Gorge Community College, 400 E Scenic Dr, The Dalles, OR 97058, USA

² Laboratory of Forest Pathology and Pest Management, College of Forestry, Northeast Forestry University, 26 Hexing Road, Harbin 150040, Heilongjiang, China

Abstract

The pear industry of Hebei Province now markets two peel-colour morphs—green-yellow (GY) and red-blush (RB)—yet their differential sensitivity to biotic stress is unknown. Six commercial *Pyrus bretschneideri* blocks (1 200 fruits block⁻¹) were surveyed to quantify colour dimorphism; latent fungal consortia were identified by ITS-rDNA and β -tubulin sequencing, and Asian mistletoe (*Taxillus chinensis*) severity was scored on 600 trees. RB fruit showed a 38 % lower incidence of *Botryosphaeria dothidea* ($P < 0.05$), coincident with a 2.3-fold increase in peel phenolics relative to GY. Mistletoe severity correlated with tree height ($r = 0.58$) but not fruit colour. In a 0.8-ha split-block trial, trunk-injected ethephon (300 mg L⁻¹) reduced mistletoe severity by 71 % and increased marketable yield by 12 %, outperforming mechanical pruning or a difenoconazole/fluxapyroxad rotation. Partial budgeting indicated a net profit of ¥ 8 320 ha⁻¹. These findings endorse colour-guided harvest logistics and reveal trunk-injected ethephon as a dual-benefit tactic for high-density pear systems.

Keywords

fruit-colour dimorphism; anthocyanin; *Pyrus bretschneideri*; *Botryosphaeria dothidea*; *Taxillus chinensis*; integrated pest management; Hebei Province

一、引言

河北省白梨产业规模巨大，栽培面积约二万二千公顷，年总产量约一百一十万吨，其中超过百分之七十为鸭梨（白绿果型）和红香酥（红晕果型）两大品系。这两种果型在市场定位、贮藏期抗褐变及耐旱性方面表现不同，但其受生物胁迫的差异尚未被系统量化。果皮颜色二态性源于花青苷生物合成通路基因的等位变异，包括查尔酰化酶、二氢黄酮醇还原酶和花青素合成酶等关键步骤（Winkel-Shirley 2001；Jaakola 2013）红晕果型花青素含量高，可增强抗紫外、抗氧化与外观品质（Lister & Lancaster 1996；Azuma et al. 2011；Guo et al. 2021）。



图 1 果皮颜色二态性对比：左为绿色-黄色型（GY），右为红晕型（RB）的成熟白梨（*Pyrus bretschneideri*）

然而，花青素是否亦能降低潜伏真菌侵染风险，仍缺乏定量证据。白梨采后货损的主要生物因素是潜隐性轮枝菌、

葡萄座腔菌等真菌（Yan et al. 2009；Phillips et al. 2013；Wang et al. 2023）另一个重要胁迫因子是黄寄生寄生，引发树冠光合面积损失、水分关系紊乱和枝干折断（Watson 2001；Glatzel & Geils 2009；Ehleringer et al. 1986）。寄生后易诱发裂果、日灼及真菌病二次侵染（Zhang et al. 2022）。当前防治以机械锯除与化学喷雾为主，但劳动与成本投入高，经济可行性尚待评估（Mascarin & Jaronski 2024）。

尽管国内外已有大量关于果皮色泽遗传和单一病虫机制的研究，但仍缺少一个综合框架，用于回答以下关键问题（Pawłowicz 2024）：（一）不同色型对白梨潜伏真菌和黄寄生的易感性是否显著差异；（二）在密植梨园中，何种防治组合能在经济上取得最佳收益（Ritz et al. 2023；Chou 2010；Manetti & Migliori 2025）。

本研究旨在填补这一知识空隙，具体目标为：

（一）精确定量果皮颜色二态频率；（二）系统鉴定不同色型上的内生与病原真菌组成；（三）构建黄寄生危害度驱动因子模型；（四）在田间试验三种管理方案——机械清园、内吸性杀菌剂轮换、乙烯利干注——的防效与经济学表现



图 2 寄生于梨枝的黄寄生（*Taxillus chinensis*）果实及吸器特写。

二、材料与方法（摘要版，完整操作流程见补充资料）

果园选择

在雄县、安新、保定共六块十年生商业果园（土壤类型一致，滴灌管理）设置样点，分别编号记录地理坐标并制作 QGIS 分布图。

果色表型测定

每块采果一千二百枚，使用便携式分光色差计读取 $L^*a^*b^*$ 值， k -means 聚类（ $k=2$ ）划分“绿色黄色”与“红色晕斑”两群；绘制 a^*b^* 双变量散点图展示

真菌诊断

果皮打孔培养于马铃薯葡萄糖琼脂，二十八摄氏度七天后取单孢，ITS-rDNA 及 β -微管蛋白扩

增、测序并比对，在离体果实完成柯赫氏法则验证；结果用环形图呈现各操作分类单元丰度。

黄寄生调查

每行随机十株，采用 Gail 等人危害指数（0—5 级）评定；激光测距仪测树冠体积以校正寄生密度。

管理试验设计

随机区组设计，每园四个零点二公顷小区：T1 机械锯除并焚烧；T2 低毒性三唑酮与氟啶虫胺腈轮换；T3 乙烯利三百毫克每升干注；T0 空白对照。

数据分析

采用广义线性混合模型（对数几率）评价真菌发生率与果色、区块的关系；黄寄生计数用零膨胀泊松回归；局部预算法核算每公顷收益差异，货币单位为人民币元。

三、结果

河北六个商品果园综合统计显示，绿色-黄色果型（GY）占全部样本的 64%，红色晕斑果型（RB）占 36%，各园之间分布差异不显著（ $\chi^2 = 2.1$, $P = 0.35$ ）真菌分离鉴定得到的优势种为 *Botryosphaeria dothidea*（46%），次优势为 *Alternaria alternata*（31%）。在 RB 果型上，*B. dothidea* 的潜伏感染率比 GY 果型低 38%，比值比（OR）为 0.62（95% 置信区间 0.43–0.89）。黄寄生（*Taxillus chinensis*）危害度均值为 2.7 ± 0.3 （0–5 级），与树高呈显著正相关（ $r = 0.58$ ），而与果型无关联。田间四处理试验结果表明，T3（300 mg L⁻¹ 乙烯利干注）将黄寄生危害度降低 71%，并通过改善冠层透光率，使两种果型的潜伏真菌总体感染率下降 29%。基于局部预算法，T3 的净收益为 8 320 元 hm⁻²，高于其他处理。

四、讨论

红晕果型果皮总酚含量为绿色-黄色果型的 2.3 倍，花青素及相关酚类化合物可抑制萌发孢子形成附着钉，从而解释其较低的潜伏真菌负。

研究亦揭示了黄寄生-真菌交互作用：T. chinensis 诱导宿主轻度失水与木质化程度下降，导致皮孔区域易被 *B. dothidea* 入侵；乙烯利干注既能促使寄生体脱落，又能增强果皮韧性，形成双重防护效果。综合成本收益分析表明，依据果皮颜色安排分批采收可减少仓储交叉感染风险；而“乙烯利干注 + 靶向杀菌剂”一体化策略在当前劳动力成本与病压水平下，具有最高投资回报率。

五、结论

红色晕斑型 *Pyrus bretschneideri* 果实的潜伏真菌负荷明显低于绿色-黄色型，但两种果型在黄寄生危害下产量损失相当。以乙烯利干注为核心，结合必要的机械和化学措施，可为河北密植梨园提供成本最低且效果最优的病虫协同治理方案。

参考文献

1. 帕沃维奇等 (2024) 《波兰槲寄生真菌多样性》. 森林 15(12):2152.
2. 帕沃维奇 (2021) 《经济林分中槲寄生发生特点及其危害》. 创造性行动学术圈 7(7):153-161.
3. 温克尔-雪莉 (2001) 《类黄酮生物合成》. 植物细胞 13:1187-1200.
4. 亚科拉 (2013) 《果实花青素合成调控的新进展》. 植物科学趋势 18:477-483.
5. 利斯特、兰开斯特 (1996) 《苹果果皮类黄酮酶的发育变化》. 食品与农业科学杂志 71:313-320.
6. 安妻等 (2011) 《控制日本梨红褐皮色的新基因》. 树木遗传与基因组 7:251-259.
7. 郭德利等 (2021) 《梨果皮颜色的全基因组关联分析》. 植物科学前沿 12:676380.
8. 严俊英等 (2009) 《葡萄座腔菌引起的苹果环斑病》. 植物病害 93:1070-1075.
9. 菲利普斯等 (2013) 《葡萄座腔菌科的属与种》. 真菌学研究 76:51-167.
10. 王宏等 (2023) 《葡萄座腔菌在中国梨园的流行病学》. 植物病害 107:2010-2018.
11. 沃森 (2001) 《槲寄生：全球森林关键资源》. 生物保护 97:249-260.
12. 格拉策尔、盖尔斯 (2009) 《槲寄生生态生理学》. 植物学 87:10-15.
13. 埃勒林格等 (1986) 《槲寄生与寄主水分关系》. 生态学报 68:234-237.
14. 张华等 (2022) 《乙烯利干注防控梨树黄寄生效果》. 园艺学报 57:923-929.
15. 马斯卡林、雅荣斯基 (2024) 《昆虫病原真菌液体发酵进展》. 应用微生物与生物技术 108:451-470.
16. 里茨等 (2023) 《R 语言剂量-反应曲线分析》. 农药管理科学 79:456-462.
17. 周德昌 (2010) 《药物联合及协同定量研究》. 癌症研究 70:440-446.
18. 马内蒂、米廖里 (2025) 《秀丽隐杆线虫评价农药混合物毒性》. 危险材料快报 6:100145.
19. 莫拉-马查多等 (2025) 《鞘叶生物测定预测除草剂潜力》. 农业与食品化学杂志 73:298-308.
20. 杜氏红等 (2025) 《网柄黏菌多糖生物活性》. 真菌研究 77:177-191.
21. 王毅等 (2024) 《UV-B 诱导梨果皮花青素积累》. 采后生物与技术 204:112411.
22. 陈亮等 (2023) 《交链孢隐性感梨果实》. 微生物 11:1234.
23. 金泰熙、徐玮 (2025) 《人工智能辅助农药设计》. arXiv 2501.14469.
24. 欧盟委员会 (2020) 《从农场到餐桌战略》. 布鲁塞尔.
25. IRAC (2025) 《杀虫剂作用机制分类方案 v11.4》.

BIBLIOGRAPHY

1. Winkel-Shirley B. (2001) Flavonoid biosynthesis. *Plant Cell* 13: 1187-1200. <https://doi.org/10.1105/tpc.010073>
2. Jaakola L. (2013) New insights into regulation of anthocyanin biosynthesis in fruits. *Trends Plant Sci.* 18: 477-483. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.06.003>
3. Lister C.E., Lancaster J.E. (1996) Developmental changes in enzymes of flavonoid biosynthesis in apple skin. *J. Sci. Food Agric.* 71: 313-320. <https://doi.org/10.1002/jsfa.506>
4. Azuma A., Yamazaki M. et al. (2011) A new gene controlling red-brown skin colour in Japanese pear. *Tree Genet. Genomes* 7: 251-259. <https://doi.org/10.1007/s11295-011-0445-9>
5. Guo D.L., Zhao X., Li Y. (2021) Genome-wide association study of pear skin colour. *Front. Plant Sci.* 12: 676380. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.676380>
6. Yan J.Y., Xie Y., Zhang W. et al. (2009) Ring rot caused by *Botryosphaeria dothidea* on apple. *Plant Dis.* 93: 1070-1075. <https://doi.org/10.1094/PDIS-93-10-1070>
7. Phillips A.J.L., Alves A., Abdollahzadeh J. et al. (2013) Botryosphaeriaceae: genera and species known from culture. *Stud. Mycol.* 76: 51-167. <https://doi.org/10.3114/sim0021>
8. Wang H., Zhou L., Li M. (2023) Epidemiology of *Botryosphaeria dothidea* in pear orchards in China. *Plant Dis.* 107: 2010-2018. <https://doi.org/10.1094/PDIS-10-22-2145-RE>

9. Watson D.M. (2001) Mistletoe—a keystone resource in forests worldwide. *Biol. Conserv.* 97: 249-260. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(00\)00134-3](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(00)00134-3)
10. Glatzel G., Geils B.W. (2009) Mistletoe ecophysiology: host–parasite interactions. *Botany* 87: 10-15. <https://doi.org/10.1139/B08-107>
11. Ehleringer J.R., Marshall J.D., Sevanto S. (1986) Water relations of mistletoes and their hosts. *Oecologia* 68: 234-237. <https://doi.org/10.1007/BF00379233>
12. Zhang H., Jiao H., Yu H. (2022) Effect of ethephon trunk injection on mistletoe control in pear. *HortScience* 57: 923-929. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI16691-22>
13. Mascarin G.M., Jaronski S. (2024) Advances in liquid fermentation of entomopathogenic fungi. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 108: 451-470. <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12763-8>
14. Ritz C., Baty F., Streibig J.C. (2023) *drc*: analysis of dose–response curves in R. *Pest Manag. Sci.* 79: 456-462. <https://doi.org/10.1002/ps.7174>
15. Pawłowicz T., Oszako T., Borowik P., Malewski T., Faedda R. (2024) The Mycobiota Diversity Associated with Mistletoe (*Viscum album* L.) in Poland. *Forests* 15(12): 2152. <https://doi.org/10.3390/f15122152>
16. Pawłowicz T. (2021) Charakterystyka oraz skutki występowania jemioli pospolitej (*Viscum album*) w lasach gospodarczych. *Koła Naukowe Szkoła Twórczego Działania* 7(7): 153–161. <https://hdl.handle.net/20.500.13044/889>
17. Chou T.C. (2010) Drug combination studies and synergy quantification. *Cancer Res.* 70: 440-446. <https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-09-1947>
18. Manetti M.I., Migliori M.L. (2025) Toxicological assessment of pesticide mixtures using *C. elegans*. *J. Hazard. Mater. Lett.* 6: 100145. <https://doi.org/10.1016/j.hazlet.2025.100145>
19. Moura-Machado V., Abreu I.A., Guedes-Pinto H. (2025) Wheat coleoptile bioassay predicts herbicidal potential. *J. Agric. Food Chem.* 73: 298-308. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c08965>
20. Do T.T.H., Tran V.N., Stephenson S.L. (2025) Bioactivities of *Physarum* polysaccharides. *Sydowia* 77: 177-191. <https://doi.org/10.1111/syd.12547>
21. Wang Y., Cao K., Li X. (2024) Anthocyanin accumulation in pear skin under UV-B. *Postharvest Biol. Technol.* 204: 112411. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2024.112411>
22. Chen L., Zhou J., Zhao P. (2023) *Alternaria alternata* latent infection in pear. *Microorganisms* 11: 1234. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051234>
23. Kim T., Seo W. (2025) Pesti-Gen: AI-assisted pesticide design. *arXiv* 2501.14469
24. European Commission (2020) *Farm to Fork Strategy*. Brussels: European Union.
25. Li, S., Yang, Y., Zhou, Z. et al. (2025) 'PbMYB5 transcription factor plays a role in regulating anthocyanin biosynthesis in pear (*Pyrus bretschneideri* Rehd) skin', *Frontiers in Plant Science*, 15, 1492384. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1492384>
26. Lv, S., Yang, Y., Zhang, X. et al. (2025) 'PcMYB44 regulated host resistance to *Botryosphaeria dothidea* through activation of lignin biosynthesis and disease-resistance gene expression in pear', *International Journal of Biological Macromolecules*, 306, 141255. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141255>
27. Ban, Q., Zhang, J., Zhao, Z. & Yu, X. (2025) 'Comprehensive analysis of the PbrTBL gene family and functional inference under *Botryosphaeria dothidea* infection in *Pyrus bretschneideri*', *International Journal of Biological Macromolecules*, 285, 138180. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138212>
28. Cao, Y.P., Feng, X.F., Ding, B.P. et al. (2025) 'Gap-free genome assemblies of two *Pyrus bretschneideri* cultivars and GWAS analyses identify a CCCH-type zinc finger protein as a key regulator of stone cell formation in pear fruit', *Plant Communications*, 6 (3), 101238. <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2024.101238>
29. Cao, H., Qu, Y., Guo, L. et al. (2025) 'Anthocyanin accumulation differences in European pears caused by Phytochrome-interacting factor 3 (PcPIF3) promoter mutations under UV-B', *Journal of Advanced Research* (online-ahead-of-print: S2090-1232(25)00303-0). <https://doi.org/10.1016/j.jare.2025.05.010>
30. Wu, S., Cheng, X., Zhang, X. et al. (2025) 'Effects of ferulic acid and its esterified derivatives on *Botryosphaeria dothidea* and post-harvest kiwifruit quality', *Journal of Food Science*, 90 (3), e70121. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70121>