喷施不同植物生长调节剂及其浓度对燕麦倒伏性及产量的影响

王 婧　石文鑫　孙瑞卿　秦 曙

（山西农业大学山西功能农产品检验检测中心，030031，山西太原）

摘　要　燕麦倒伏是影响产量的主要因素之一，为研究不同植物生长调节剂及浓度对燕麦倒伏性和产量的影响，以同燕3号为材料，在拔节期前叶面喷施不同浓度的矮壮素（0.80×10³、1.25×10³、2.00×10³、4.00×10³和6.00×10³ mg/kg）、乙烯利（250、400、500、650和900 mg/kg）和多效唑（150、200、250、300和400 mg/kg），以喷等量清水为对照（CK），探讨不同浓度的化学调控处理对燕麦植株抗倒伏能力和产量的影响。结果表明，喷施矮壮素、乙烯利和多效唑均能不同程度降低燕麦株高。喷施矮壮素对燕麦茎秆基部第2节间的直径和抗折力影响不大，但当浓度在4.00×10³~6.00×10³ mg/kg时株高显著降低，抗倒伏效果比较显著；喷施乙烯利浓度在650~900 mg/kg时可以增强抗折力和增加穗粒数，从而显著增产；喷施多效唑浓度在200~250 mg/kg时可以显著降低株高，增加茎秆基部第2节间直径，增强茎秆抗折力，增加穗粒数，显著提高燕麦植株的抗倒伏能力和产量，且效果优于矮壮素和乙烯利。综合分析，喷施浓度为4.00×10³ mg/kg的矮壮素能显著提高燕麦的抗倒伏能力；喷施浓度为650 mg/kg的乙烯利能显著提高燕麦产量；喷施浓度为200 mg/kg的多效唑同时显著提高燕麦抗倒伏能力和产量，且效果最佳。

关键词　矮壮素；乙烯利；多效唑；燕麦；抗倒伏；产量

燕麦是我国北方地区重要的杂粮作物，也是优质的粮饲兼用作物[1]，国内产地主要分布在东北地区，以及内蒙古、青海、甘肃、河北北部和山西北部等干旱和半干旱地区，具有抗旱、耐寒、耐瘠薄和耐适度盐碱的特点。燕麦是一种优质的杂粮，含有丰富的氨基酸、蛋白质、脂肪、粗纤维和β-葡聚糖等成分，其营养价值高，口感好，具有一定的保健作用[2]。随着市场认可度越来越高，燕麦种植面积不断扩大，育种速度逐步加快，品种资源持续丰富。然而，由于燕麦种植在海拔高的多风地区，土壤干旱贫瘠，且燕麦植株高大、茎秆细弱，所以极易发生倒伏[3]，倒伏后茎秆的输导系统遭到破坏，叶片组织受损，光合作用降低[4]，严重影响其籽粒的产量与品质，成为制约燕麦高产的重要因素之一。另外，燕麦的株高和茎秆机械强度，尤其是茎秆基部第2节间的长度和直径与植株倒伏有密切关系[5]。因此，可以通过矮化株高和增强茎秆基部机械强度来提高燕麦的抗倒伏能力和产量。

植物生长调节剂是根据植物内部激素的结构和作用，人工合成的可以调节植物生长发育的化合物，其能调控植株形态、增强茎秆强度和优化群体结构，可有效防止作物倒伏[6]。矮壮素、乙烯利和多效唑都属于植物生长延缓剂，可以抑制植物生长素合成，使细胞生长速度变慢、植株变矮。矮壮素可有效矮化株高，提升基部节间机械强度，增加单位面积有效穗数，对籽粒产量有一定的促进作用[7]，已在小麦[8]和水稻[9]等作物上广泛应用。乙烯利作为乙烯释放剂，可以促进果实成熟和着色，促进雌花分化和开花结果，诱导植物雄性不育[10]，还有抑制植物生长、使植株变矮和打破种子休眠等多种作用，在果品中应用广泛[11]。多效唑可以抑制植物茎秆伸长生长、促进分蘖[12]、增加叶绿素含量、提高作物抗逆性和千粒重，具有“矮化、强茎、增产”三重效应。利用化学调控技术可以安全且高效地实现作物增产，矮壮素、乙烯利和多效唑作为常用的植物生长调节剂，可通过抑制植物体内赤霉素的合成或促进乙烯的释放，改变内源激素的合成[13]，从而矮化燕麦植株茎秆高度、改善茎秆形态、降低倒伏率以及提高籽粒产量，这种调控方法已在水稻[14]、小麦[15]、糜子[16]、谷子[17]和藜麦[18]等农作物上被广泛应用。已有研究[19]表明，对小麦喷施适当浓度的矮壮素可以降低株高和重心高度，提高茎秆基部节间的抗折

作者简介：王婧，主要从事农药残留与应用研究，E-mail：wangjing264@126.com
秦曙为通信作者，主要从事农药残留研究，E-mail：qinshu55@126.com
基金项目：山西省基础研究计划青年科学研究项目（202103021223173）
收稿日期：2025-06-18；修回日期：2025-07-21；网络出版日期：2025-12-03

力，从而增强抗倒伏能力；聂萌恩等[20]发现叶面喷施多效唑可明显提高谷子叶片的叶绿素含量，进而提高作物光合效率；刘振宇等[21]在谷子拔节期喷施乙烯利和矮壮素螯合药剂，发现谷子株高明显降低，改善了叶片荧光性能，从而提高谷子产量。

植物生长调节剂作为化学调控植物生长的重要技术手段，在果树种植中应用广泛[22]，在主粮作物种植中的应用也越来越多，但在燕麦生产中的研究报道较少。基于此，本研究以同燕 3 号为供试品种，使用矮壮素、乙烯利和多效唑 3 种典型植物生长调节剂开展田间试验，比较不同调节剂及浓度对燕麦茎秆形态、抗倒伏性与产量的调控效应，探究最佳喷施浓度，明确其作用规律并构建指标关联体系，以期为燕麦的高产抗倒种植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于山西省朔州市怀仁市山西农业大学试验基地开展，海拔 1033 m，2022-2023 年平均气温 8.5 ℃，降水量 480~570 mm，无霜期 140~150 d，冷凉干燥，昼夜温差大，属温带季风气候。试验区土壤以沙壤土为主，含有机质 15.86 g/kg、有效磷 21.42 mg/kg、有效钾 143.17 mg/kg，pH 8.45。

1.2 供试材料

供试燕麦品种为山西农业大学提供的同燕 3 号，该品种具有抗旱、抗病和耐瘠薄等特点。供试药剂为 50%矮壮素水剂、40%乙烯利水剂和 15%多效唑可湿性粉剂，均由四川国光农化股份有限公司提供。

1.3 试验设计

于 2022-2023 年进行试验，分别在 2022 年 5 月 28 日和 2023 年 5 月 17 日开始，采用随机区组设计，每个处理小区面积为 20 m^2（5 m×4 m），每小区 14 行，行距 28 cm，行长 5 m，试验区四周设 2 m 保护行，播种深度 4.0~6.0 cm，播种量约为 130 kg/hm^2。于拔节期前 15 d 叶面喷施 3 种植物生长调节剂，每种植物生长调节剂设置 5 个浓度，1 个对照，3 次重复。矮壮素、乙烯利和多效唑的喷施浓度分别为：矮壮素 0.80×10^3（A1）、1.25×10^3（A2）、2.00×10^3（A3）、4.00×10^3（A4）和 6.00×10^3 mg/kg（A5），乙烯利 250（Y1）、400（Y2）、500（Y3）、650（Y4）和 900 mg/kg（Y5），多效唑 150（D1）、200（D2）、250（D3）、300（D4）和 400 mg/kg（D5），每个处理小区喷施 2 L，以喷等量清水为对照（CK）。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 *形态指标* 于乳熟期，每个处理小区随机选取长势一致、未倒伏的燕麦植株 10 株，用木直尺测定燕麦的株高、茎秆基部第 1 节和第 2 节的茎长，用游标卡尺测定茎秆基部第 2 节的直径，用剪刀从基部剪取燕麦植株后称量茎秆鲜重，再剪取穗部，测定穗长及穗重。统计燕麦植株的茎蘖数。

1.4.2 *倒伏性相关指标* 测定乳熟期燕麦植株基部至茎秆（带穗、叶和鞘）平衡点的距离为重心高度；取基部第 2 节茎秆，留出长度为 5 cm 的茎秆放置于支架凹槽内，用茎秆强度测定仪（YYD-1，杭州托普仪器有限公司）测定茎秆抗折力，并计算倒伏指数，茎秆倒伏指数=（茎秆重心高度×单株鲜重）/茎秆抗折力。

1.4.3 *产量及其构成因素* 于燕麦成熟期收获前，每小区随机选取长势一致、未倒伏的燕麦植株 10 株，统计穗粒数和千粒重；每个处理小区随机选取 1 m^2 面积收获，统计有效穗数，并折合成单位面积有效穗数，计算理论产量：理论产量（kg/hm^2）=有效穗数（×10^4/hm^2）×穗粒数×千粒重（g）/100；待试验处理区燕麦成熟收获后，脱粒风干后测定实际产量。

1.5 数据处理

采用 Excel 2021 进行数据处理，采用 SPSS 26 进行方差分析，采用 Origin 2018 软件作图，采用 Duncan 法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同植物生长调节剂及其浓度对燕麦主茎形态的影响

从表 1 可以看出，3 种植物生长调节剂均具有矮化植株高度的作用。随着矮壮素喷施浓度的增大，茎秆高度呈阶梯式降低，差异显著，在 A5 处理下最低，较 CK 降低了 11.41%。不同浓度的多效唑对燕麦茎秆高度均有显著降低作用，D5 处理下的茎秆高度最低，较 CK 降低了 8.48%。不同浓度的乙烯利对降低株高的作用不显著，3 种植物生长调节剂对燕麦植株茎秆鲜重的影响各不相同。除 A1 处理外，矮壮素降低了茎秆鲜重，各处理降幅依次为 A4＞A5＞A3＞A2。多效唑喷施浓度越大茎秆鲜重增加越明显，D3 处理增加幅度最大。不同

浓度乙烯利可以增加燕麦茎秆鲜重，但各浓度间的差异不显著。矮壮素和乙烯利对燕麦穗长和穗重的作用不显著，而喷施多效唑可以显著增加穗重，当浓度为 150~300 mg/kg 时可以显著增加穗长。

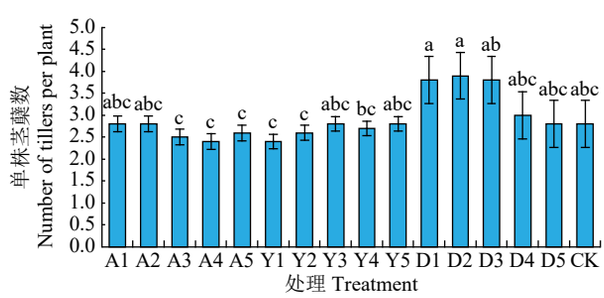
表 1　不同处理对燕麦主茎秆形态的影响

Table 1　Effects of different treatments on stem traits of oat

处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	茎秆鲜重 Fresh weight of stem (g)	穗长 Panicle length (cm)	穗重 Panicle weight (g)
CK	90.88±2.09a	5.81±1.15def	17.60±1.17cd	2.04±0.46def
A1	89.66±1.59a	6.01±0.28def	17.85±0.91c	2.17±0.22d
A2	87.62±1.46b	5.58±0.34def	17.33±0.82cde	1.84±0.18efg
A3	82.02±1.60de	5.25±0.28ef	16.55±0.78de	1.67±0.19g
A4	81.40±1.58ef	5.13±0.31f	16.27±0.81e	1.75±0.21fg
A5	80.57±1.11f	5.24±0.23ef	16.52±0.74de	1.68±0.21g
Y1	87.52±1.29b	6.75±0.88d	17.51±1.11cd	2.08±0.23de
Y2	86.30±1.08b	6.14±0.55def	16.97±1.20cde	1.93±0.19defg
Y3	87.29±1.57b	6.56±0.48d	17.16±1.22cde	2.10±0.27de
Y4	86.76±1.22b	6.23±0.76def	17.45±0.98cd	2.20±0.28d
Y5	86.18±1.58b	6.37±0.69de	16.62±1.52de	2.06±0.26de
D1	87.56±1.48b	9.93±1.67c	20.10±1.17a	2.91±0.47bc
D2	86.35±1.54b	11.11±2.27b	19.52±0.97ab	3.27±0.37a
D3	84.55±1.62c	12.14±2.34a	19.79±0.92ab	3.12±0.35ab
D4	84.05±1.03c	10.92±1.48bc	18.90±1.17b	2.82±0.35c
D5	83.17±1.92cd	9.94±1.20c	17.89±1.18c	2.67±0.37c

同列不同小写字母表示不同处理间存在显著差异（$P<0.05$）。下同。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$). The same below.

由图 1 可知，不同浓度的矮壮素和乙烯利对燕麦植株分蘖有一定抑制作用，但影响不显著。多效唑可以显著增加单株茎蘖数，随着浓度的增加，单株茎蘖数先增大后减小，D2 处理下最大，可增加 37.10%。



不同小写字母表示不同处理间存在显著差异（$P<0.05$）。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$).

图 1　不同处理对燕麦单株茎蘖数的影响

Fig.1　Effects of different treatments on number of tillers per plant of oats

2.2　不同植物生长调节剂及其浓度对燕麦倒伏性的影响

2.2.1　对燕麦茎秆基部形态的影响　由表 2 可知，喷施矮壮素和乙烯利可以显著降低植株茎秆基部第 1 节间和第 2 节间长，但是对茎粗的影响不显著。当多效唑的浓度在 200~400 mg/kg 时可以显著降低基部第 2 节间长，当浓度在 150~300 mg/kg 时可以显著增加基部第 2 节间直径。由图 2 可以看出，喷施矮壮素和乙烯利可以显著降低植株茎秆基部第 1 和第 2 节间长的占比，而多效唑对植株茎秆基部节间长占比的影响不显著，这是由于矮壮素和乙烯利对燕麦生长的延缓作用对早期基部生长比较明显，多效唑对燕麦生长的延缓作用在全生育期较平稳。

表 2　不同处理对燕麦茎秆基部节间形态的影响

Table 2　Effects of different treatments on basal internode traits of oat

处理 Treatment	基部第 1 节间长 Length of the first basal internode (cm)	基部第 2 节间长 Length of the second basal internode (cm)	基部第 2 节间直径 Diameter of the second basal internode (mm)
CK	5.12±0.75abc	7.65±0.97a	3.59±0.41cde
A1	3.86±0.54ef	6.92±0.78bcd	3.64±0.50cde
A2	3.30±0.56g	6.26±0.59ef	3.33±0.62e
A3	3.41±0.60fg	6.53±0.63cde	3.27±0.35e
A4	4.23±0.53de	7.01±0.65bc	3.51±0.45de
A5	3.69±0.84fg	6.50±0.78cde	3.64±0.54cde
Y1	4.28±0.50de	5.95±0.16fg	3.56±0.32de
Y2	3.87±0.37ef	6.12±0.15efg	3.85±0.35bcd
Y3	4.25±0.55de	5.66±0.23g	3.65±0.28cde
Y4	3.39±0.50fg	5.96±0.18fg	3.78±0.19bcd
Y5	4.72±0.56cd	5.68±0.27g	3.87±0.23bcd
D1	5.53±0.34a	7.37±0.35ab	3.99±0.40abc
D2	4.96±0.32bc	6.98±0.31bcd	4.27±0.16a
D3	4.70±0.25cd	6.62±0.34cde	4.29±0.44a
D4	5.19±0.50abc	6.48±0.44de	4.15±0.60ab
D5	5.29±0.25ab	6.56±0.41cde	3.87±0.26bcd

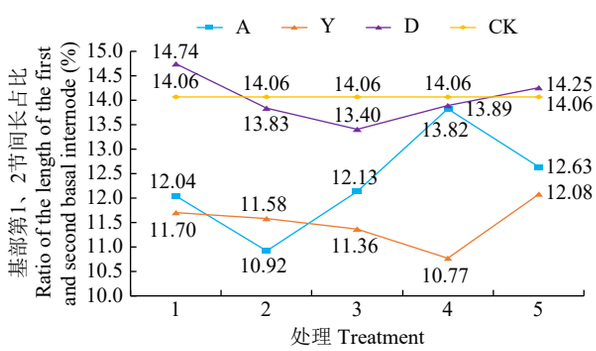


图 2　不同处理对燕麦基部节间长占比的影响

Fig.2　Effects of different treatments on ratio of basal internode of oat

2.2.2　对燕麦倒伏指数及相关指标的影响　3 种植物生长调节剂均可降低植株的重心高度，燕麦的重

心高度和倒伏指数呈正相关。由表 3 可以看出，随着矮壮素和多效唑浓度的增加，可以显著降低茎秆的重心高度，但各浓度乙烯利对降低茎秆重心高度的作用差异不显著。各浓度矮壮素和乙烯利对燕麦茎秆抗折力的影响不规律，差异不显著。随着多效唑浓度的增加，茎秆抗折力先增大后减小，在 D2 处理下最大，达到 12.19 N，较 CK 增加 35.90%。植物生长调节剂各浓度间的茎秆抗折力和倒伏指数呈负相关。浓度为 1.25×10^3~6.00×10^3 mg/kg 的矮壮素和浓度为 400~900 mg/kg 的乙烯利均可降低倒伏指数，其中 A5 和 Y5 处理下的降低效果最好，分别较 CK 降低 27.43%和 11.96%。多效唑降低倒伏指数的效果显著，各浓度下降低幅度分别为 60.33%、61.93%、63.03%、56.26%和 40.46%。

表 3 不同处理对燕麦抗倒伏指数及相关指标的影响

Table 3 Effects of different treatments on lodging index and related indexes of oat

处理 Treatment	重心高度 Center of gravity height (cm)	抗折力 Bending strength (N)	倒伏指数 Lodging index
CK	45.88±0.90ab	8.97±1.44ef	30.59±8.87abc
A1	46.21±1.82a	8.81±1.83def	32.73±7.04ab
A2	44.73±1.82bc	8.79±0.99def	28.72±3.84bcd
A3	42.62±1.18efg	8.47±1.19f	26.79±3.15cde
A4	42.96±1.84efg	9.26±1.37def	24.08±2.38ef
A5	41.95±1.48g	10.10±1.47cde	22.20±3.52fg
Y1	44.75±0.81bc	8.93±1.40ef	34.59±6.42a
Y2	44.56±1.03c	10.74±1.09bc	25.62±2.82def
Y3	44.80±0.79bc	9.86±1.41cde	30.30±4.42bc
Y4	44.18±0.95cd	10.40±1.18cd	26.95±5.68cde
Y5	43.83±1.08cde	10.45±1.07cd	26.93±3.74cde
D1	44.86±1.01bc	10.85±1.58bc	12.14±2.05h
D2	43.23±0.70def	12.19±1.14a	11.65±1.43h
D3	41.84±1.35g	11.74±1.40ab	11.31±2.22h
D4	42.29±0.68fg	9.08±1.21ef	13.38±2.54h
D5	42.97±1.28efg	6.34±0.69g	18.34±3.64g

2.3 不同植物生长调节剂及其浓度对燕麦产量构成因素的影响

喷施不同浓度的矮壮素、乙烯利和多效唑对燕麦产量构成因素的影响如表 4 所示，喷施矮壮素对穗粒数的影响不显著，喷施乙烯利可以显著增加穗粒数，喷施多效唑对增加穗粒数的效果显著，乙烯利和多效唑对穗粒数增加幅度最大，分别为 17.48%和 46.99%。有效穗数主要受播种浓度和茎秆分蘖情况等因素影响，所以喷施矮壮素、乙烯利和多效唑对有效穗数影响不明显。喷施矮壮素后燕麦千粒重与 CK 处理相比均有所降低，各浓度乙烯利和多效唑对千粒重的影响呈不规律变化，Y3、Y4、Y5 和 D2 处理下燕麦千粒重增加效果最好。通过表 4 可以看出，喷施 3 种植物生长调节剂对穗粒数的影响大于对有效穗数和千粒重的影响，所以穗粒数是影响理论产量的主要因素。

表 4 不同处理对燕麦产量构成因素的影响

Table 4 Effects of different treatments on yield components of oat

处理 Treatment	穗粒数 Grain number per panicle	有效穗数 Effective panicles ($\times10^4$/hm^2)	千粒重 1000-grain weight (g)
CK	34.90±6.92ef	314.00±10.58abcd	24.61±0.70ab
A1	35.10±3.54ef	320.67±6.51ab	22.35±0.37ef
A2	33.50±2.72f	312.33±14.50abcd	22.76±0.35def
A3	34.50±3.06ef	318.67±7.09abc	23.87±0.36bc
A4	36.00±2.67def	313.67±7.37abcd	23.77±0.35bc
A5	37.10±2.92cdef	302.67±7.02cdef	22.85±0.26de
Y1	41.00±4.27c	312.00±11.53abcd	22.29±0.35ef
Y2	39.90±2.73cd	303.33±5.69cdef	23.55±0.29cd
Y3	37.70±4.14cde	320.67±11.02ab	25.02±0.19a
Y4	40.50±3.27c	294.67±12.66ef	25.43±0.51a
Y5	36.40±4.12def	325.00±6.24a	25.45±0.33a
D1	47.80±4.13ab	307.00±9.54bcde	23.61±0.32cd
D2	50.10±2.92a	315.67±7.64abc	24.85±0.76a
D3	51.30±3.16a	319.00±5.00abc	23.83±0.36bc
D4	47.60±5.60ab	297.00±8.89def	21.95±0.82f
D5	44.70±5.19b	288.67±6.51f	22.03±0.70ef

由表 5 可知，实际产量略小于理论产量，但数值变化趋势一致。喷施各浓度的矮壮素对燕麦实际产量影响不显著。喷施乙烯利可以增产，浓度为

表 5 不同处理对燕麦产量的影响

Table 5 Effects of different treatments on the yield of oat kg/hm^2

处理 Treatment	理论产量 Theoretical yield	实际产量 Actual yield
CK	2725.31±93.68bc	2295.65±87.87de
A1	2515.59±40.04d	2210.00±36.06ef
A2	2381.28±101.34d	2121.67±48.56f
A3	2624.57±85.72cd	2280.00±17.45de
A4	2683.83±78.92c	2250.00±62.45de
A5	2565.65±55.68cd	2150.00±130.77ef
Y1	2849.84±62.43b	2366.67±72.34d
Y2	2850.23±19.71b	2476.67±35.32cd
Y3	3024.74±124.06b	2513.33±55.08c
Y4	3033.56±75.73b	2536.67±72.34c
Y5	3009.87±24.07b	2520.00±79.37c
D1	3466.06±151.42a	2783.33±85.05b
D2	3929.38±98.50a	3096.67±32.15a
D3	3899.27±45.63a	2983.33±41.63a
D4	3101.73±115.39b	2663.33±58.59b
D5	2841.00±347.23b	2616.67±40.41bc

650 mg/kg 时产量最大，较 CK 增加 10.5%，各浓度产量增幅在 3.1%~10.5%。喷施多效唑的增产效果极为显著，产量随浓度增大呈先升高后降低的变化趋势，在浓度为 200 mg/kg 时产量达到最大（3096.67 kg/hm^2），较对照增产 34.89%，各处理增产程度依次为 D2＞D3＞D1＞D4＞D5。

2.4　倒伏相关指标和产量及其构成因素的相关性分析

各处理的倒伏相关指标和产量及其构成因素的相关性分析结果（表 6）表明，与倒伏指数相关性较大的为茎秆鲜重（r=−0.845）和茎秆基部第 2 节间直径（r=−0.788），与实际产量相关性较大的为穗重（r=0.922）、茎秆基部第 2 节间直径（r=0.900）和单株穗粒数（r=0.914），说明本研究中鲜重和茎秆基部第 2 节间直径对燕麦的抗倒伏能力的影响较大，穗重、茎秆基部第 2 节间直径和穗粒数对燕麦的产量影响较大。产量与倒伏指数呈显著负相关（r=−0.755）。

表 6　倒伏相关指标和产量及其构成因素的相关性分析

Table 6　Correlation analysis of lodging related indexes and yield and its components

性状 Trait	PH	FW	PL	PW	LF	LS	DS	CH	BS	LI	GN	EP	GW	AY
PH	1.000													
FW	−0.039	1.000												
PL	0.268	0.889**	1.000											
PW	0.133	0.967**	0.933**	1.000										
LF	0.138	0.703**	0.632**	0.705**	1.000									
LS	0.120	0.212	0.415	0.280	0.438	1.000								
DS	0.012	0.877**	0.765**	0.888**	0.647**	0.110	1.000							
CH	0.887**	−0.385	−0.060	−0.213	−0.057	0.105	−0.328	1.000						
BS	0.109	0.298	0.403	0.381	0.054	−0.009	0.562*	−0.119	1.000					
LI	0.375	−0.845**	−0.731**	−0.792**	−0.577*	−0.345	−0.788**	0.620*	−0.403	1.000				
GN	−0.099	0.954**	0.860**	0.931**	0.631**	0.166	0.898**	−0.414	0.431	−0.849**	1.000			
EP	0.281	−0.209	−0.094	−0.148	−0.121	−0.009	−0.181	0.243	0.327	0.290	−0.298	1.000		
GW	0.207	−0.140	−0.097	−0.014	−0.048	−0.142	0.099	0.114	0.562*	0.057	−0.083	0.394	1.000	
AY	0.043	0.893**	0.801**	0.922**	0.633**	0.110	0.900**	−0.300	0.560*	−0.755**	0.914**	−0.064	0.271	1.000

PH：株高；FW：茎秆鲜重；PL：穗长；PW：穗重；LF：茎秆基部第 1 节间长；LS：茎秆基部第 2 节间长；DS：茎秆基部第 2 节间直径；CH：重心高度；BS：抗折力；LI：倒伏指数；GN：穗粒数；EP：有效穗数；GW：千粒重；AY：实际产量。“*”表示在 P < 0.05 水平显著相关，“**”表示在 P < 0.01 水平极显著相关。

PH: plant height; FW: fresh weight of stem; PL: panicle length; PW: panicle weight; LF: length of the first basal internode; LS: length of the second basal internode; DS: diameter of the second basal internode; CH: center of gravity height; BS: bending strength; LI: lodging index; GN: grain number per panicle; EP: effective panicles; GW: 1000-grain weight; AY: actual yield. “*” indicates significant correlation at P < 0.05 level, “**” indicates extremely significant correlation at P < 0.01 level.

3　讨论

燕麦主产区大多为干旱冷凉地区，易受到干旱和大风等自然灾害影响，倒伏情况直接影响燕麦产量。燕麦的抗倒伏能力主要由茎秆机械强度决定[23]，尤其是茎秆基部第 2 节间形态、茎秆基部第 2 节的抗折力与抗倒伏能力呈正相关[24]。植物生长调节剂可以通过矮化株高、增加茎秆基部茎粗、茎蘖数和穗粒数来提高燕麦的抗倒伏性和产量[25]，不同的植物生长调节剂对燕麦的调节作用不同，同一种植物生长调节剂在不同的浓度下的作用效果也不同。

3 种植物生长调节剂都属于植物生长延缓剂，可以通过抑制燕麦体内赤霉素的合成来抑制植株茎秆基部细胞的有丝分裂和延长，从而降低燕麦的株高[26]。随着矮壮素和多效唑浓度的增大，燕麦株高呈明显下降趋势，研究[27]表明，随着矮壮素和多效唑浓度的增加，可以显著降低植物体内可溶性蛋白和可溶性糖的含量，从而降低植物的生理活性，这也是抑制燕麦株高的重要因素。但不同浓度的乙烯利对燕麦植株的矮化效果差异不大。田间燕麦种植密度、施肥情况和气候条件等因素均会影响燕麦茎秆基部的生长发育，基部茎秆的长度和直径对植株生长的稳定性有重要影响，尤其对基部第 2 节的影响最为显著。燕麦抗倒伏能力与茎秆重心高度、茎秆基部情况以及植株鲜重有关。降低茎秆重心高度可以缩短营养物质和水分向上运输的距离，提高茎秆充实度，喷施矮壮素、乙烯利和多效唑可以不同程度地影响燕麦的抗倒伏能力。喷施矮壮素对燕麦茎秆基部第 2 节间的直径和抗折力影响不大，但

可以通过显著降低燕麦株高来提高抗倒伏能力，当其浓度在 4.00×10^3~6.00×10^3 mg/kg 时效果比较明显。乙烯利可以促使植物体内分解并释放出乙烯，促进蛋白质的合成，同时加快纤维素的合成，提高基部节间的机械强度和维管束的数目，因此喷施乙烯利可以增加燕麦茎秆基部直径和抗折力，当浓度在 650~900 mg/kg 时效果比较显著，但由于其对燕麦植株高度的降低效果不如矮壮素，所以乙烯利对燕麦植株抗倒伏能力的影响不显著。喷施多效唑可以显著降低燕麦株高，并且还可以显著增强植株中的过氧化物酶活性，清除植物体内超氧阴离子自由基，加快茎秆组织中碳水化合物转化为木质素，促进了木质素的合成与积累，增加了燕麦茎秆基部组织的机械强度。本研究中多效唑提高燕麦植株抗倒伏力的效果优于矮壮素和乙烯利，且在浓度 200~250 mg/kg 时效果较好。提高产量是使用植物生长调节剂调控燕麦生长发育的主要目的。同一试验地燕麦种植的密度、田间管理和气候条件基本相同，所以有效穗数差异不大。喷施矮壮素、乙烯利和多效唑均可通过增加穗粒数来提高产量，增加穗粒数的效果依次为多效唑＞乙烯利＞矮壮素，乙烯利的浓度在 500~900 mg/kg 时效果较好，多效唑的浓度在 200~250 mg/kg 时效果较好，且多效唑的效果优于乙烯利。

矮壮素、乙烯利和多效唑的主要作用是矮化株高、提高抗倒伏力、增加分蘖数以及提高产量，前人对植物生长调节剂在燕麦上的研究报道较少，龚建军等[28]在燕麦拔节期喷施 1%的矮壮素和 10%乙烯利，发现燕麦株高比对照降低 10~12 cm，这 2 种植物生长调节剂均可以通过抑制植株基部茎秆生长来降低株高，并且矮壮素降低株高的效果比乙烯利显著，但对穗粒数和产量影响不显著；周海涛等[29]研究发现喷施浓度为 4.0 mL/L 的矮壮素可以降低燕麦株高，提高燕麦的抗倒伏能力；陈冠州等[30]研究表明，在拔节期喷施 600 mg/L 的乙烯利可以降低燕麦株高和重心高度、增加穗粒数并提高产量，但对有效穗数影响不显著。耿小丽等[31]研究表明多效唑和矮壮素均可降低燕麦株高并增加茎粗，提高燕麦产量，当矮壮素浓度为 4.0 mL/L 时产量提高了 17.95%，多效唑浓度为 1.2 g/L 时产量提高了 7.95%，其推荐的浓度和本研究虽有差异，但其他结果基本一致。本试验对多效唑的研究结果与谷子[32]和黑小麦[33]的研究结果一致，均可降低作物茎秆重心高度、增大茎粗、增强植物抗倒伏性并增产。

喷施矮壮素、乙烯利和多效唑对燕麦抗倒伏能力和产量有重要影响，但这 3 种植物生长调节剂如果通过浸种方式施用，或与生物农药结合使用，将对燕麦的抗逆性和产量产生何种影响，需要进一步研究。

4 结论

矮壮素、乙烯利和多效唑均能降低燕麦株高，其中矮壮素可以提高植株抗倒伏性，但增产效果不理想；乙烯利可提高产量，但对植株抗倒伏性影响不大；多效唑可以有效提高植株抗倒伏性和产量，且效果显著。考虑到燕麦植株形态、茎秆基部形态、茎秆分蘖情况、倒伏指数、产量、土壤污染情况和成本等因素，结合田间实际生长情况，推荐喷施浓度为 4.00×10^3 mg/kg 的矮壮素提高燕麦的抗倒伏性，喷施浓度为 650 mg/kg 的乙烯利提高产量，喷施浓度为 200 mg/kg 的多效唑同时提高抗倒伏性和产量，且效果明显优于其他 2 种植物生长调节剂。

参考文献

[1] 袁艺，陈冬明，刘伟，等. 川西北高原饲用燕麦产量和生殖性状相关性分析及综合评价. 四川农业大学学报，2023，41(6)：1116-1123.
[2] 范昱，冯亮，王俊珍，等. 不同品种燕麦的营养成分分析. 作物杂志，2024(4)：71-81.
[3] 杨晶，刘文辉，梁国玲，等. 高寒地区不同燕麦品系抗倒伏相关性状分析. 草业学报，2020，29(12)：50-60.
[4] 杨志雪，刘景辉，米俊珍，等. 播量对缩行带状滴灌燕麦抗倒伏能力和产量的影响. 作物学报，2024，50(11)：2831-2847.
[5] 南铭，马艳明，柴继宽，等. 不同倒伏性燕麦茎秆强度及其木质素合成基因表达特点. 草地学报，2025，33(5)：1363-1371.
[6] 马南楠，王怡然，王凤，等. 植物生长调节剂对荫蔽胁迫燕麦缓解效应的研究. 草学，2024(6)：61-68.
[7] 孙培杰，王媛媛，陈涛，等. 喷施矮壮素与延缓施氮对冬小麦抗倒伏能力及产量形成的影响. 应用生态学报，2024，35(8)：2141-2149.
[8] 张永强，陈传信，聂石辉，等. 矮壮素滴施时期对冬小麦茎秆抗倒伏能力的调控分析. 新疆农业科学，2023，60(8)：1873-1878.
[9] 姜龙，曲金玲，孙国宏，等. 矮壮素、烯效唑和多效唑对水稻倒伏及产量的影响. 中国林副特产，2018，34(2)：10-13，18.
[10] 牟立同，王维斌，程芳梅，等. 乙烯利在富士系苹果阿森泰克上的疏花效果. 西北园艺，2024(6)：73-75.
[11] 王婧，石文鑫，李伟，等. 探究植物生长调节剂对果树生长及水果品质的影响. 果树资源学报，2022，3(6)：75-80.
[12] 周建霞，丰兆平，陈晓阳，等. 分蘖期施用多效唑对杂交水稻 C 两优 817 产量及主要性状的影响. 杂交水稻，2021，36(2)：

72-74.
[13] 杨招娣，郭凤根，王仕玉，等. 植物生长抑制剂对藜麦农艺性状和穗发芽抗性的影响. 中国农业科技导报，2024，26(5)：44-51.
[14] 胡星晨，张耀元，窦志，等. 不同植物生长调节剂施用对水稻产量和品质的影响研究. 中国农学通报，2024，40(33)：11-17.
[15] 章蓉，姜恩熙，陈思，等. 乙烯利与 1-甲基环丙烯调控小麦穗部籽粒形成的研究. 作物杂志，2023(6)：101-107.
[16] 李志华，穆婷婷，杨金慧，等. 多效唑和矮壮素对糜子抗倒伏性及产量的影响. 山西农业科学，2023，51(10)：1219-1225.
[17] 闫锋，董扬，赵富阳，等. 植物生长调节剂对谷子生长发育的调控效应. 华北农学报，2023，38（增）：112-118.
[18] 姚丹，李雪莹，韩笑，等. 植物生长调节剂对藜麦形态指标及其产量构成因素的影响. 吉林农业大学学报，2021，43(1)：33-40.
[19] 康靓，张娜，张永强，等. 矮壮素滴施量对滴灌冬小麦茎秆特征及其抗倒伏性的影响. 新疆农业科学，2022，59(1)：63-69.
[20] 聂萌恩，柳青山，白文斌，等. 喷施多效唑对谷子生长及生理特性的影响. 农学学报，2020，10(2)：18-23.
[21] 刘振宇，于肖，秦岭，等. 乙烯利和矮壮素螯合生长调节剂对谷子农艺和产量性状的影响. 山东农业科学，2021，53(3)：29-35.
[22] 凌道勋. 植物生长调节剂在果树培育中的作用分析. 南方农业，2019，13(8)：3-4.
[23] 康勇建，赵宝平，武俊英，等. 追氮时期对饲用燕麦茎秆理化特性和抗倒性的影响. 草地学报，2020，28(6)：1775-1783.
[24] 梁国玲，刘文辉，秦燕，等. 不同燕麦资源生物量构成和茎秆特征与倒伏间的相关性研究. 草地学报，2019，27(5)：1339-1346.
[25] 罗霄，康文婧，刘琪，等. 植物生长延缓剂对新疆高产冬小麦群体特征及抗倒性的影响. 干旱地区农业研究，2024，42(6)：80-92.
[26] 曹庆军，杨粉团，王一鸣，等. 植物生长调节剂及其在大田作物上的应用分析. 吉林农业科学，2015，40(5)：26-30.
[27] 周志军，杨宇元，王浩，等. 矮壮素和多效唑处理对油桐幼苗生长及生理特性的影响. 中南林业科技大学学报，2025，45(6)：43-54.
[28] 龚建军，赵桂琴，马雪琴. 矮壮素与乙烯利对燕麦株高、产量及其构成因素的调节作用. 草业科学，2008，25(5)：74-77.
[29] 周海涛，赵孟圆，张新军，等. 缩节胺和矮壮素对燕麦生长发育和产量的调控效应. 作物杂志，2020(5)：188-193.
[30] 陈冠州，袁搏，杨会勇，等. 外源物质对燕麦生长、抗倒伏性及产量的影响. 河北北方学院学报（自然科学版），2024，40(3)：5-11.
[31] 耿小丽，武慧娟，付萍，等. 叶面喷施多效唑、矮壮素、缩节胺对燕麦抗倒伏性和种子产量的调节作用. 草业科学，2023，40(9)：2340-2347.
[32] 鱼冰星，王宏富，王振华，等. 多效唑对谷子茎秆特征及抗倒性的影响. 中国农业科技导报，2021，23(8)：37-44.
[33] 闫秋艳，鲁晋秀，赵政萍，等. 生长调节剂对黑小麦茎秆性状及其籽粒产量和品质的影响. 麦类作物学报，2020，40(9)：1082-1089.

Effects of Spraying Different Types and Concentrations of Plant Growth Regulators on Lodging Resistance and Yield of Oat

Wang Jing, Shi Wenxin, Sun Ruiqing, Qin Shu

(Shanxi Center for Testing of Functional Agro-Products, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, Shanxi, China)

Abstract　Lodging is one of the major factors affecting oat yield. To investigate the effects of different plant growth regulators and their concentrations on lodging resistance and yield of oat, the cultivar Tongyan No. 3 was used as the test material. Before the jointing stage, foliar sprays of different concentrations of chlormequat chloride (0.80×10^3, 1.25×10^3, 2.00×10^3, 4.00×10^3, and 6.00×10^3 mg/kg), ethephon (250, 400, 500, 650, and 900 mg/kg), and paclobutrazol (150, 200, 250, 300, and 400 mg/kg) were applied, with an equal volume of water as the control (CK), to explore the regulatory effects of different concentrations of chemical regulation treatments on lodging resistance and yield of oat plants. The results showed that all three regulators reduced plant height to varying degrees. Spraying chlormequat chloride had little effect on the diameter and bending strength of the second basal internode, but significantly reduced plant height and enhanced lodging resistance at concentrations of 4.00×10^3-6.00×10^3 mg/kg. Spraying ethephon at 650-900 mg/kg could enhance bending strength and increase grain number per panicle, thereby significantly increasing oat yield. Spraying paclobutrazol at 200-250 mg/kg significantly reduced plant height, increased the diameter of the second basal internode, enhanced stem bending strength, and increased grain number per panicle, thereby significantly improving both lodging resistance and yield, with effects superior to those of chlormequat chloride and ethephon. Comprehensive analysis indicated that chlormequat chloride at 4.00×10^3 mg/kg significantly improved lodging resistance, ethephon at 650 mg/kg significantly increased yield, and paclobutrazol at 200 mg/kg significantly enhanced both lodging resistance and yield, showing the best overall effect.

Key words　Chlormequat chloride; Ethephon; Paclobutrazol; Oat; Lodging resistance; Yield